

火电厂碳捕集技术：现状、应用与发展

陈阿小¹, 冉真真², 马双忱³, 樊帅军³, 张小霓², 徐少杰², 冯礼奎⁴, 曹求洋⁴

(1. 深圳市深汕特别合作区华润电力有限公司, 广东 深圳 518230 2. 润电能源科学技术有限公司, 河南 郑州 450018;

3. 华北电力大学(保定), 河北 保定 071066; 4. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310000)

摘要:在“双碳”目标下,我国火电厂碳捕集技术取得了一定的进展。目前,碳捕集技术主要有燃烧前碳捕集技术、富氧燃烧及燃烧后碳捕集技术。首先,介绍3种碳捕集技术的发展现状、技术研究进展,并综合比较3种技术的优缺点及适应场景;总结国内外碳捕集示范工程项目;重点介绍化学吸收法吸收剂研究及节能降耗技术发展现状;最后针对化学吸收法技术发展面临的困难与挑战,提出未来碳捕集技术发展的三大方向:高效低能耗吸收剂研发、节能降耗工艺开发、脱碳系统自动化发展。

关键词:火电厂;燃烧前碳捕集;富氧燃烧;燃烧后碳捕集;工程示范;节能降耗

中图分类号:X701 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2024)S1-0052-13

Carbon capture technology in thermal power plants: Present situation, application and development

CHEN Axiao¹, RAN Zhenzhen², MA Shuangchen³, FAN Shuaijun³, ZHANG Xiaoni²,

XU Shaojie², FENG Likui⁴, CAO Qiuyang⁴

(1. Shenzhen Shenzhen-Shantou Special Cooperation Zone China Resources Power Co., Ltd., Shenzhen 518230, China;

2. CR Power Energy Science and Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450018, China; 3. North China Electric Power University

(Baoding), Baoding 071066, China; 4. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: Under the goal of 'double carbon', the carbon capture technology of thermal power plants in China has made some progress. At present, carbon capture technology mainly includes pre-combustion carbon capture technology, oxygen-enriched combustion and post-combustion carbon capture technology. Firstly, the development status and research progress of three carbon capture technologies are introduced, and the advantages and disadvantages of the three technologies and the adaptation scenarios are comprehensively compared. Summarize carbon capture demonstration projects at home and abroad; the research of chemical absorption absorbent and the development status of energy saving and consumption reduction technology are mainly introduced. Finally, in view of the difficulties and challenges faced by the development of chemical absorption technology, three directions for the development of carbon capture technology in the future are proposed: the development of high-efficiency and low-energy absorbents, the development of energy-saving and consumption-reducing processes, and the development of decarbonization system automation.

Key words: thermal power plant; pre-combustion carbon capture; oxy-fuel combustion; post-combustion carbon capture; engineering demonstration; energy saving

0 引言

我国是碳排放大国,为了应对气候变化带来的紧迫威胁,2020年9月22日,习近平主席提出“碳达峰、碳中和”行动方针,我国已经把碳达峰碳中和

纳入国家生态文明建设的整体布局中。火电行业作为全国碳排放的主要来源,碳排放约占全国碳排放总量的45%,其碳减排对我国实现“碳中和”目标有着重要影响。在碳中和的背景下,对存量采用化石燃料发电机组,碳捕集、利用与封存(CCUS)技术是唯一能

收稿日期:2024-04-12;责任编辑:常明然 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.NN24041201

基金项目:中国科学院A类战略性先导科技专项资助项目(XDA29020300;XDA29030100)

作者简介:陈阿小(1977—),男,福建南安人,高级工程师。E-mail: chenaxiao@crpower.com.cn

通讯作者:冉真真(1992—),女,河南郑州人,硕士研究生。E-mail: ranzhenzhen1@crpower.com.cn

引用格式:陈阿小,冉真真,马双忱,等.火电厂碳捕集技术:现状、应用与发展[J].洁净煤技术,2024,30(S1):52-64.

CHEN Axiao, RAN Zhenzhen, MA Shuangchen, et al. Carbon capture technology in thermal power plants: Present situation, application and development[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(S1): 52-64.

够降低化石能源碳排放,同时不大规模改变现有生产工艺的低碳技术,是火电转型必不可少的技术手段。

目前,中国已投运和建设中的 CCUS 示范工程约 49 个,火电厂占 70% 以上,我国已投用煤电 CCUS 项目 14 个,总捕集能力约 110 万 t/a。随着国家政策的支持,中国 CCUS 技术逐步成熟,示范工程建设会加速推进。因此作为碳中和的兜底技术,研究火电厂碳捕集技术的发展具有重大的意义。

火电厂碳捕集技术主要有燃烧前碳捕集技术、富氧燃烧技术和燃烧后碳捕集技术。3 种技术路线各有其优缺点,综合比较 3 种技术的优缺点及适用场景,重点介绍适用于火电厂行业的化学吸附法,并研究当前火电厂碳捕集技术的工程应用进展,最后

提出未来碳捕集技术路线的发展方向。为优化碳捕集工艺流程、降低系统综合能耗、实现系统智能化控制提供一定的方向。

1 碳捕集技术路线研究进展

1.1 燃烧前碳捕集技术路线研究进展

燃烧前捕集技术指将捕集到的气体成分通过化学反应转化成 H_2 和 CO_2 , 捕集的 CO_2 浓度相对较高,约为 15%~60%,在火电厂的应用主要是整体煤气化联合循环发电系统。燃烧前捕集技术所采用的 CO_2 分离捕集方式主要采用以下 3 种物理捕集法:聚乙二醇二甲醚法、低温甲醇法和膜分离法。燃烧前捕集技术路线工艺流程如图 1 所示。

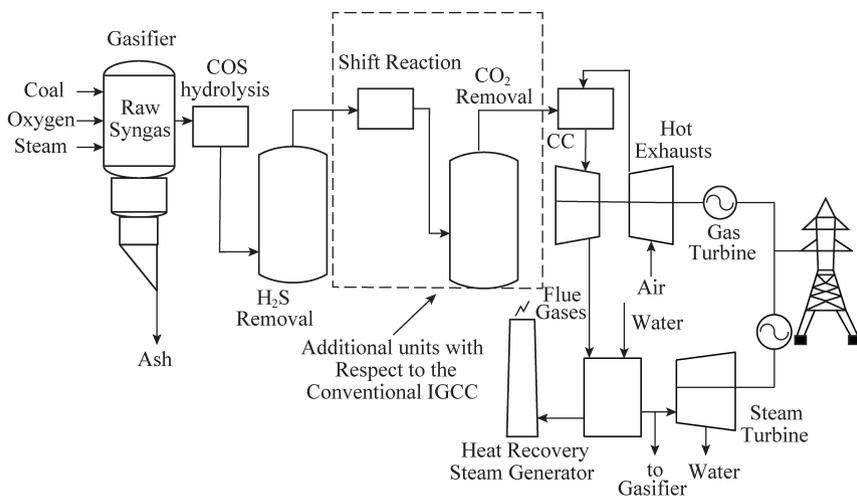


图 1 基于 IGCC 火电厂的 CO_2 捕集技术原理^[1]

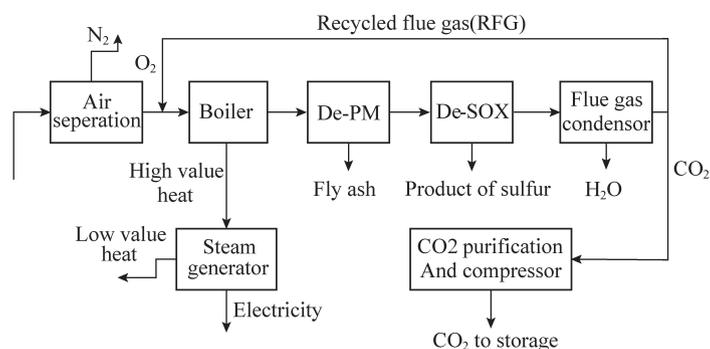
燃烧前碳捕集系统具备系统建设优势,能实现较低的能耗,并在空气污染排放方面展现出较优潜能,但 IGCC 发电技术存在投资成本高,可靠工艺系统复杂,稳定性有待提高等问题。鉴于将传统煤粉锅炉改造为 IGCC 发电设施涉及成本高昂,IGCC 技术主要适用于新建火电机组的规划与实施。综合分析,在目前技术基础上,尚不适宜大规模商业发展。

1.2 富氧燃烧碳捕集技术研究进展

富氧燃烧技术是碳捕集技术之一,该技术是在燃烧中捕获 CO_2 , 它将通过空气分离获得的纯氧(氧气浓度 >95%) 与循环烟气混合用以代替空气燃烧,从而提高排放气体中的 CO_2 浓度(可高于 90%), 进而对高浓度的 CO_2 进行冷凝压缩以对燃烧排放的 CO_2 进行封存或再利用^[2]。富氧燃烧技术工艺流程如图 2 所示。

鉴于目前影响富氧燃烧技术大规模发展的主要是成本问题,分别为附加投资成本和运行成本,本文重点阐述新增富氧燃烧技术的经济性分析。国外相

关学者在富氧燃烧技术经济性分析方面研究较早, M.Liszka 研究发现在增设了空分系统和烟气处理系统之后,对二氧化碳进行提纯压缩条件下,整个系统的净电生成效率相应下降了 10.89%,在考虑压缩封存能耗时,相对于传统火电厂,上述两种情况还会消耗 14% 和 32.8% 的能量^[4]。E.kakaras 采用 360 MWt 褐煤电厂为研究对象,研究表明在对系统进行富氧改造后,净发电效率由 40.83% 下降到 28.7%,而充分利用空分系统和烟气处理系统的废热后,净发电效率可以提高到 32.29%^[5]。IHI(日本石川岛播磨^[6]和瑞典 Chalmers 大学^[7]研究结果显示,进行富氧燃烧改造后,系统效率分别会降低 10.5%、9.1%。美国阿贡实验室对 500 MW 系统进行研究,结果显示 CO_2 的减排成本是 34 美元/t^[8];美国 ALSTOM 对 450 MW 系统进行研究结果显示 CO_2 的减排成本为 42 美元/t^[9];加拿大 CANMET 能源技术中心采用 400 MW 系统为研究对象,其结果显示进行富氧燃烧改造后, CO_2 的减排成本为 35 美元/t^[10]。

图 2 富氧燃烧碳捕集系统工艺流程^[3]

在国内,华中科技大学是最早开展富氧燃烧技术研究的单位^[11],熊杰选取国内典型的 600 MW 超临界发电系统为研究对象,从能源-经济-环境三个方面对富氧燃烧技术进行较为全面的分析和评价,结果表明新增空分系统和尾气处理系统后富氧燃烧系统整体热效率降低 10.84%,富氧燃烧的发电成本增加 0.39~0.42 倍,系统 CO₂ 的减排成本是 160~184 元/t,碳捕集成本是 115~128 元/t^[12]。孔红兵建立 600 MW 发电系统富氧燃烧模型,对传统发电系统、空分系统以及 CO₂ 压缩纯化系统进行耦合优化,研究显示富氧燃烧火电厂的供电效率由原来的 37.69% 降低至 28.73%,富氧燃烧火力发电厂的电力供应成本相较于传统火力发电厂增加了 46.3%,其二氧化碳减排成本为 172 美元/t,而二氧化碳捕集成本则为 129 美元/t^[13]。陈春香运用生命周期评估方法对 300 MW 亚临界机组富氧燃烧系统的各

种能源消耗进行分析,研究结果显示,发电机组的能源消耗占总消耗约 81.77%,煤炭运输的能耗占比为 3.8%,氧气制备的能耗占 8%,而二氧化碳回收的能源消耗占比为 6.43%^[14]。

综合分析,富氧燃烧过程的投入资本和运营花费相对较高,其额外投资费用约占 50%~70%,运营成本则占 30%~40%,目前主要成本集中于制氧设备的投资和运行上,鉴于目前氧气生产设备和技术的相应成本削减空间有限,每吨 CO₂ 捕集成本在 40~60 美元。未来随着碳税政策的实施和碳汇市场的逐渐成熟,富氧燃烧技术将会体现出技术优势。

1.3 燃烧后碳捕集技术路线研究进展

燃烧后脱碳技术从燃烧生成的烟气中分离 CO₂,是目前最成熟的碳捕集技术,主要包括化学吸收法、物理吸附法、膜分离以及低温分馏技术,每种技术都有其优势和局限性,具体见表 1。目前化学

表 1 燃烧后二氧化碳捕集技术对比分析

燃烧后二氧化碳捕集技术	技术特点	面临挑战	未来发展趋势
化学吸收法	技术成熟、分离效果好、适用范围广泛,具有良好的反应性能和较高的吸收能力,已实现大规模商业示范化应用。	吸收剂再生能耗高、降解率高、系统综合能耗高,捕集成本有待进一步降低,塔器设备体积大,设备腐蚀率高,溶剂排放对环境造成影响	开发出低成本低能耗的新型吸收剂;开发系统节能降耗工艺
吸附分离法	具有可逆性、再生能耗低,适用于低浓度二氧化碳捕获。具有不同类型的吸附技术:变压吸附(PSA)、变温吸附(TSA)、真空吸附(VSA)、压力变真空吸附(PVSA)	吸附剂材料的选择,二氧化碳捕集性能有待提升,需提高吸附循环稳定性来适应真实工业烟气环境,吸收剂需要定期进行再生	为实现高捕获性能和高选择性,需要对吸收材料的结构/表面进行改性研究,满足经济性好、二氧化碳吸附容量高、环保、操作简单等特点
膜分离法	膜分离技术施工简单、设备成本低、能耗低、分离纯度高;渗透性和选择性之间的相互制约阻碍了膜技术大规模应用	膜分离法需要较高的浓度驱动力,制造成本较高,为适应工业烟气的高流量,需要采用较大的膜面积;膜性能易受运行条件(温度、压力、含湿率)影响	开发先进的新型膜,提高二氧化碳的捕获量,实现膜分离法的大规模示范化应用
低温分离法	适用范围有限,主要适用于高浓度和高压气体的碳捕集场景。成本和能耗较高,仅在高二氧化碳含量条件下,此方法才具有较高的经济可行性	高能量需求,更适用于高二氧化碳体积分数(>50%),分离前,必须除去气体混合物中的水分,防止造成堵塞,此外,在换热器表面连续积聚固化的二氧化碳会对传热产生不利影响,并降低分离效率	未来还需设计和优化更有效的低温工艺

吸收法已实现大规模示范化应用,最为成熟。化学吸收法是利用弱碱性吸收剂与 CO_2 低温(约 40~

50 °C) 发生化学反应,在加热(100~120 °C)条件下,发生可逆反应,释放 CO_2 [15]。工艺如图 3 所示。

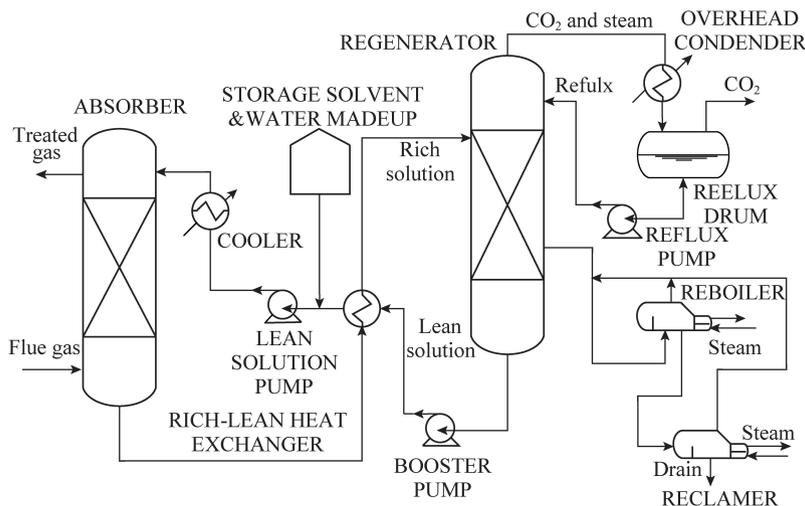


图 3 化学吸收法脱除 CO_2 工艺系统 [16]

1.3.1 吸收剂发展研究

化学吸收法发展的重点在于吸收剂的研究,目前有机胺吸收剂如一乙醇胺(MEA)、2-氨基-2-甲基-1-丙醇(AMP)、哌嗪(PZ)等,是燃煤烟气电厂碳捕集工业示范的主流吸收剂 [17-18],具备捕集效率高(>90%)、纯度高(>99%)等优势,但存在再生能耗高、易挥发、降低率高等问题。因此,相关企业及科研院所,正在开展新型有机胺吸收剂、相变吸收剂 [19]、无水吸收剂、无机氨吸收剂、离子液体等技术研发和工业试验,有望进一步降低吸收剂的再生能耗、降解率及腐蚀率,提高吸收负荷容量。

目前,吸收剂研究已经由传统的第一代吸收剂发展至第三代新型碳捕集吸收剂,使再生热耗由传统 MEA 吸收剂的 ~4.0 GJ/t 降低至 2.2~2.8 GJ/t。一、二、三代吸收剂实验室性能数据对比,见表 2。

表 2 三代碳捕集吸收剂实验室性能数据对比

项目	一代吸 收剂	二代吸 收剂	三代吸收剂	
	MEA	复合胺	离子 液体	相变吸 收剂
吸收速率/($10^8 \text{ kmol} \cdot \sim 200$ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$))		~360	~380	~360
吸收负荷/($\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	0.5	0.8~1.0	0.5	0.6~1.0
黏度/(cp)	~10	~15	~500	50~100
解吸能耗/($\text{GJ} \cdot \text{t}^{-1}$)	4.0	2.8~3.2	2.8~3.5	2.2~2.6
价格/(万元· t^{-1})	~1.0	3.0~4.5	~10.0	~6.0
稳定性	易降解	结合 不同胺 优势	黏度 大,不稳 定	降解 导致分 相恶化
技术成熟度	高	高	低	低

1) 混合胺吸收剂。混合胺吸收剂的重点研究方向之一在于不同胺基吸收剂的复配,通过不同吸收剂间的互配,实现吸收剂间优势性能的互补。叶凯研究对比不同吸收剂的复配效果,伯胺与仲胺的组合具有较快的动力学特性优势, CO_2 吸收容量有限、再生过程能耗高的缺点;叔胺与空间位阻胺的组合则具有与伯胺与仲胺组合关键性能参数互补的特点,如较高的 CO_2 吸收容量和较低的再生能耗,较低反应动力学 [20]。采用优化伯胺、仲胺、叔胺和空间位阻胺等有机胺组分的复配比例,有望获得具有更高 CO_2 吸收速率、更高 CO_2 吸收负荷以及更低再生能耗的高效有机胺吸收剂。如, IDEM [21] 和 COMWAY [22] 研究以 MEA 为主体,分别与 MDEA、三级胺(DMEA、DEEA)和位阻胺(AMP)组成的混合胺,研究表明复配的混合胺较原主体吸收剂(MEA)具有更高循环容量和更低的再生能耗;此外, ZHANG 等 [23] 研究发现通过调整 MEA/MDEA/PZ 比例,混合胺吸收剂有不同的能耗表现,解吸再生能耗降低幅度在 15.22%~49.22%; NWA OHA 等 [24] 研究表明,由 AMP、MDEA 和 DETA 组成的混合胺吸收剂较 MEA 吸收剂循环负荷和循环容量提高一倍以上,同时解吸再生能耗降低超过 50%。

目前,日本三菱的 KS-1 吸收剂、Shell Cansolv 公司研发的 DC-201 和 DC-103 吸收剂、德克萨斯大学配置的 PZ 混合胺吸收剂,都表现出高效的吸收性能和稳定的化学性质,已经在工业示范工程中展现出广阔的应用前景。此外,南化院 MA 吸收剂为代表的混合胺吸收剂已经能将捕集能耗从 4 GJ/t CO_2 降低至 2.8~3.3 GJ/t。

2) 相变吸收剂。在 CO_2 捕集过程中, 相变吸收剂通过吸附作用来减少 CO_2 的排放。这种吸附过程通常伴随着负载或温度的变化, 导致吸收剂发生液固或液液分相反应。在这种分相过程中, 富含 CO_2 的溶液位于底层, 称为富液, 而 CO_2 含量较低的溶液位于上层, 称为贫液。与传统的有机胺吸收剂相比, 相变吸收剂具有较低的能耗、较大的碳容量和较高的吸附效率等优点。

根据吸收剂在吸附 CO_2 后产生的不同形态, 可将相变吸收剂分为液固型和液液型两大类^[25]。液固型吸收剂在吸附 CO_2 后产生的固相物质具有高黏性和易形成胶状物的特点, 这使得其在输送至再生塔的过程中面临诸多挑战, 如泵、管道和换热器堵塞, 甚至可能导致管道腐蚀。这些缺点限制了液固型吸收剂在工业应用中的普及。因此, 重点介绍液液型相变吸收剂, 这类吸收剂根据溶液体系的不同, 可分为单一型、多元混合型和无水型 3 种^[26]。

单元相变吸收剂。针对单元相变吸收剂, 在降低吸收剂再生能耗、提高吸收剂吸收容量方向是目前研究重点。WANG 等^[27]研究表明, 在模拟火电厂烟气条件 (15% CO_2 , 85% N_2) 下, 当 2-甲基氨基乙醇 (MAE)、正丁醇和 H_2O 的质量比为 3:4:3 时, MEA/正丁醇/ H_2O 体系具有最佳吸收解吸性能, 再沸器热负荷较 30% MEA 溶液降低 50%。LI 等^[28]和 杨叶等^[29] 分别通过试验发现, 当二乙烯三胺 (DETA)、1-丙醇和 H_2O 为 3:3:4 时, 可实现约 90% 的 CO_2 富集于下液相, 吸收负荷最高为 1.53 mol/mol; 当甲基二乙醇胺 (MDEA)、正丁醇和 H_2O 的质量比为 3:4:3 时, 吸收剂再生能耗最低为 2.87 GJ/t。

多元混合吸收剂。多元混合吸收剂普遍由两种或多种具有各异吸收特性的有机胺组成。多元混合吸收剂的形成主要依赖吸收速率较快的一、二级胺作为主导吸收剂。为了提高主导吸收剂的吸收效能并降低再生能耗, 会加入吸收速率较慢的三级胺或空间位阻剂作为分相促进剂^[30]。刘飞^[31]和 LI^[32]等分别研究不同多元混合吸收剂在模拟烟气 (12% CO_2) 条件下吸收剂的关键性能, 结果显示, N,N-二乙基乙醇胺 (DEEA)+轻乙基乙胺 (AEEA)+ H_2O 相变吸收体系, 吸收负荷为 2.92 mol/kg, 吸收剂再生能耗降低至 2.2 GJ/t; TETA/二乙胺乙醇 (DEEA)/ H_2O 相变体系, 相较于 30% MEA 溶液, 该体系循环吸收容量增加 74%, 再生能耗降低 25%。HU 等^[33]提出一种新型相变吸收体系 MAE/3-二甲氨基-1-丙醇 (3DMA1P)/二乙二醇二甲醚

(DGM)/ H_2O 并用于捕集模拟烟气中 CO_2 , 结果表明该吸收体系循环容量较 30% MEA 溶液高 74.2%, 解吸和再生速率均提高两倍左右, 再生能耗降低至 2.33 GJ/t CO_2 。

无水吸收剂。无水吸收剂组成成分较传统胺吸收剂不同, 其采用有机溶剂替代传统胺溶剂中的水, 可以减少水分蒸发过程中带走的潜热, 降低吸收剂再生能耗。郭晖^[34]将 MEA 溶解于二乙二醇二甲醚 (DEGDME) 中, 用于捕集模拟烟气中的 CO_2 (13%), 研究表明, MEA/DEGDME 无水吸收剂在反应过程中会发生液液相变, 其中 99.6% 的 CO_2 富集在下液相, 该吸收系统的吸收能力约为 30% MEA 溶液的 1.7 倍, 再生能耗约为 30% MEA 溶液的 45%。BAI 等^[35]构建了一个 N-乙基乙醇胺 (EMEA)/DEEA/二甲苯 (PX) 的无水相变系统, 用于捕集烟气中的 CO_2 , 研究发现, 该相变系统在吸收 CO_2 至饱和时, 约有 98.8% 的 CO_2 富集在下液相, 且再生能耗低至 1.71 GJ/t。WANG 等^[36]使用 DETA/环丁烷吸收烟气中的 CO_2 , 研究表明该体系总热负荷比 30% MEA 溶液降低了 19%。

综合分析来看, 不同性能的液-液相变吸收剂由于不存在固体沉降问题, 运输更为方便, 并且具有显著的节能优势, 因此更适合工业应用场景。不同液液相变吸收剂关键性能参数见表 3。

表 3 不同液液相变吸收剂关键性能参数

液液相变吸收剂	富相 CO_2 含量%	循环容量	再生能耗	参考文献
DEEA/AEEA/ H_2O	95.0	较 30% MEA 高 58%	2.2 GJ/t	[31]
TETA/DEEA/ H_2O	99.4	较 30% MEA 溶液高 74%	比 30% MEA 溶液低 25%	[32]
MEA/DEGDME	99.6	1.40 mol/kg	约为 MEA 溶液的 45%	[34]
EMEA/DEEA/PX	98.8	—	1.71 GJ/t	[35]

3) 无机氨吸收剂。无机氨吸收二氧化碳的过程类似于传统的胺法, 反应生成的产物为碳酸铵和碳酸氢铵的水溶液。这些产物经过浓缩、结晶和精炼后, 可转化为肥料, 带来经济效益。相比之下, 使用氨作为吸收剂的碳捕集技术具有显著优势, 包括较高的吸收速率、较低的腐蚀风险、较低的再生能耗和更佳的经济实用性。此外, 这种方法相对于常规胺法更为稳定, 能有效抵御烟气中其他成分的影响, 并能够同时处理多种酸性气体污染物。

基于无机氨吸收剂的碳捕集技术可分为以下几种类型: ① 吸收-解吸法: 吸收过程中无 NH_4HCO_3

结晶,溶液 NH_4HCO_3 需要控制在 20% 以内, pH 控制在 9.5 以上,产物为纯 CO_2 气体。优点是塔内无结晶产生,不会产生结垢堵塞等问题。但由于 NH_4HCO_3 含量过低,脱碳液循环倍率低,解吸需要能耗较大,所设置汽提塔型更大;② 有结晶的吸收解吸法,可用两种吸收反应器,膜接触器与喷淋塔。相较于无结晶的吸收-解吸法,需要控制脱碳液较低的 pH。通过分区脱碳将吸收和结晶两个单元分开,塔型设计会更为复杂,由此也可能会产生堵塞与板结的问题。由于解吸处理富液饱和度更高,含水量更小,其脱碳所需热量也就越小,能耗较低;③ CU 一体化,将 NH_4HCO_3 含量大于 50% 的富液直接离心、脱水、干燥,生产 NH_4HCO_3 肥料;可以通过添加 DCD(双氰胺)方式将 NH_4HCO_3 转化为 LEABC (Long Effective Ammonium Bicarbonate)。此工艺的整个过程的损失为 1 229.32 kJ/kg,运行成本低于其他氨法碳捕集工艺,其储运成本远低于地质封存与海底封存。

4) 离子液体。离子液体 (ILs) 是指由无机或有机阳离子和阴离子组合构成的一种熔融盐^[37],其具有较低蒸气压、较高的液体温度范围、不可燃性、高热稳定性等优势,近年来被视为一种具有潜力的 CO_2 吸收剂^[38]。

常规 ILs 通常包括咪唑盐型^[39]、吡咯烷盐型^[40]、铵盐型^[41]、磺酸盐型^[42]等,作为物理吸收剂的 ILs 主要是通过 ILs 与 CO_2 之间的范德华力相互作用,如色散力作用^[43]、阴离子- CO_2 ^[44]和阳离子- CO_2 ^[45]之间的静电力作用来实现对 CO_2 的捕获。由于常规咪唑基离子液体在吸附 CO_2 过程中,需要很高的压力且存在吸附能力不强现象,限制了其广泛的发展。

负载型离子液体吸收剂较传统吸收剂具备更高的吸收速率,制备过程为,将 ILs 整合到具有广阔表面积和大孔径的多孔支架中,制作出固态吸收剂。相关研究表明,在 MOF-808 表面组装具有高孔隙率的离子液体分子层 (ILMLs),以实现 CO_2 的有效吸附,由于 CO_2 与 ILs 之间的路易斯酸碱相互作用及多种范德华力, CO_2 的吸附亲和力得到了显著增强,从而提高了吸附效率^[46]。

氨基酸基离子液体 (AAILs) 在捕集二氧化碳方面表现出巨大的潜力,然而,纯 AAILs 的高黏度会导致传质速度减缓,并且成本较高^[47], AAILs 相关技术突破还在进一步研发中。

新型的低共熔溶剂 (DESs)^[48] 因其低挥发性、不可燃性以及高稳定性等特性而备受关注。相关研

究结果显示^[49-52], CO_2 被 DESs 吸收,随着压力的提高,其溶解度呈现出增加趋势;然而,随着温度的上升,溶解度会有降低趋势。在一项研究中,研究者们开发了一种三元混合物^[53],用于化学吸附 CO_2 ;这种混合物由氯化胆碱 (ChCl)、丙三醇 (Gly) 和超强碱 (SB) 按照比例 1:2:7 组成,数据显示每克 DESs 能够捕获 105 mg 的 CO_2 。此外, WANG 等^[54] 利用 1,8-二氮杂双环[5.4]-7-十一碳烯 (DBU) 与百里酚 (Thy) 和香芦酚 (Car) 制备出以生物酚衍生的超强碱 ILs, 试验将 ILs 与氢键受体乙二醇 (EG)

2) 系统余热利用技术。化学吸收法碳捕集系统中 CO_2 解吸再生过程是系统主要热源需求,通过采用热交换器、热泵等技术将解吸反应后余热进行二次利用,减少再生过程的能源消耗。该技术中关键工艺为富液分级流和解吸塔级间加热工艺。

富液分级流工艺。该工艺用于回收解吸塔再生气中水(体积分数约 50%^[62]) 的汽化潜热,预加热进入解吸塔的冷富液,降低解吸过程能耗,具体为一小部分吸收剂经冷富液泵送入解吸塔顶,回收 CO_2 再生气热量,另一大部分冷富液吸收经贫富液换热器吸收热贫液热量后进入解吸塔进行再生反应,工艺流程见图 5^[63-64]。TARONG 采用质量分数 30% MEA 吸收剂进行性能测试,数据显示富液分级流最佳分流比例为 15%,在该情况下再生能耗可降低约 7%^[65]。YAN 等^[66] 提出将膜换热器与富液分级流工艺相结合,可进一步提高解吸塔再生气水中的汽化潜热,如图 6 所示,4 nm 陶瓷膜换热器中进行冷富液和再生气热量交换,热量回收可以达到 300~400 kJ/kg H_2O ^[67]。

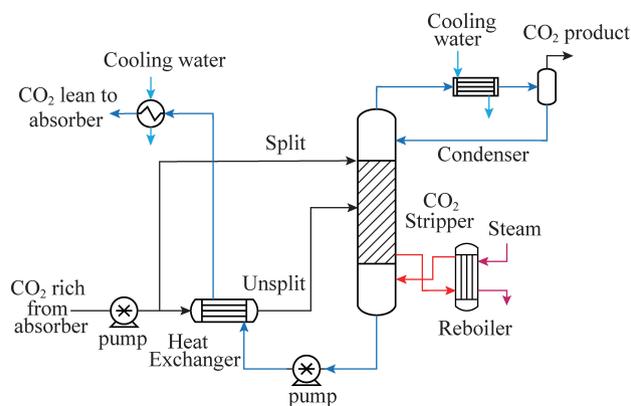
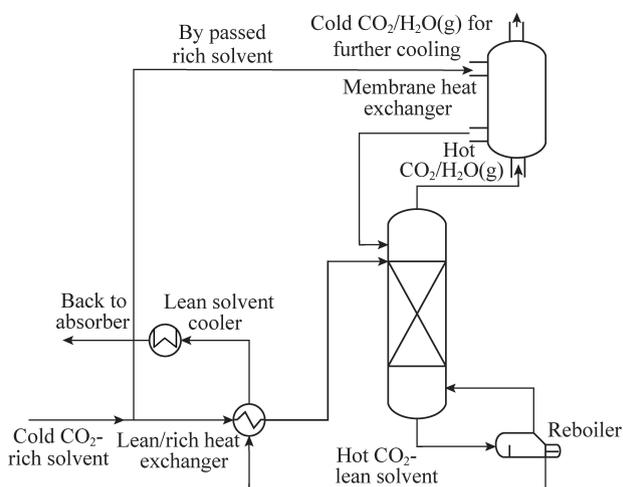
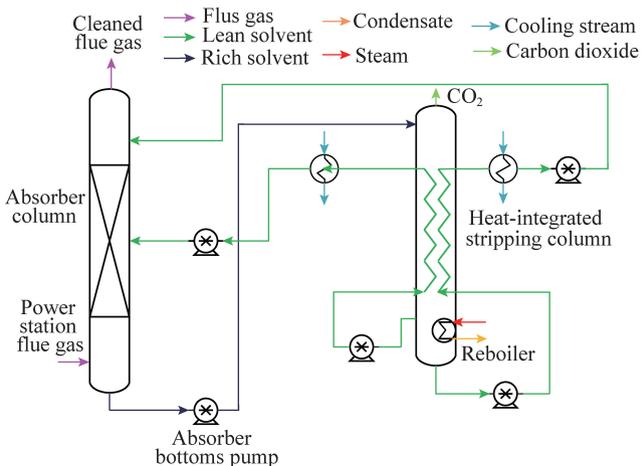


图 5 传统富液分级流工艺流程^[63-64]

解吸塔级间加热工艺。从解吸塔中通过泵抽取一部分半贫液,利用解吸塔塔釜出口的热贫液(温度在 90~100 °C),对其进行加热,最后通过半贫液泵将其重新送回解吸塔,由此降低外界热源的输入。如图 7 所示。级间加热解吸塔工艺有利于反应平衡

图 6 膜换热器-富液分级流工业流程^[66]

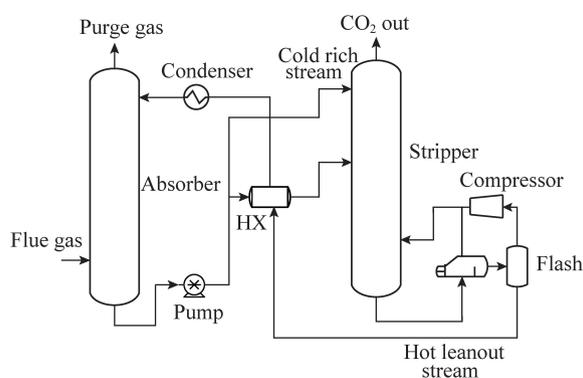
与运行工况沿塔高方向更接近,降低损失,再生能耗降低约 11.4%^[68]。

图 7 级间加热解吸塔工艺流程^[67]

3) 热泵技术。机械蒸汽再压缩工艺(MVR)是对解吸过程中产生的气化潜热进行二次利用,提高系统潜热利用率。

目前已投入商业示范项目应用的技术为热贫液闪蒸压缩工艺。该工艺由热贫液泵、闪蒸罐和机械压缩机组成,如图 8 所示^[69-70],具体工艺流程如下:从解吸塔塔釜出来的温度在 90~100℃ 的热贫液,经闪蒸罐、机械压缩机升温 and 增压后,形成的二次蒸汽被再次送入解吸塔中。相关研究表明,30% MEA 吸收剂最优闪蒸压力约为 1.2×10^5 Pa(解吸塔压力 1.8×10^5 Pa),再生能耗降低 10.35% 左右^[71-72]。采用贫液闪蒸压缩工艺再生能耗最大可以降低 25% 左右,相应电耗增加 0.1~0.2 GJ/t CO₂^[73]。

4) 关键设备设计优化。塔器高效填料设计优化。鉴于规整填料塔具备建设成本低、塔内压降小、运行成本低等优势,目前,在建或投运碳捕集项目普遍采用的都是规整填料塔。在塔器材质选择方面,

图 8 热贫液闪蒸压缩工艺流程^[69-70]

全面分析设备运行需求、经济成本,在大型商业示范工程中,塔器材质多选用不锈钢填料^[74]。

塔器内部填料的布局、型式、材质会直接影响 CO₂ 吸附-解吸过程,对填料进行优化设计,可以直接降低塔器压降、增强塔内气液传质系数,减少设备尺寸,降低系统建设成本。目前波纹板填料和聚丙烯填料是研发重点。在波纹板填料研究方面,瑞士苏尔寿公司研发的 Mellapak 波纹规整填料,提高了塔内气液传质效率和降低设备腐蚀率;在 Mellapak 波纹规整填料的基础上,进一步降低塔内压降,研发出 Montz-pak 规整填料^[75];Mellapak CCTM 填料可有效降低塔内压降,提高气液传质速率,进一步降低设备建设投资成本^[76]。

聚丙烯材料较金属填料具有价格及安装优势,但,亲水性较差,导致气液传质效率低,近些年来较多方法研究进行了聚丙烯材料的改性研究,等离子处理法^[77]、表面接枝聚合^[78-79]被认为是最有效的改性方法。董文峰^[56]提出分别通过添加 PP-g-MAH、在聚丙烯材料表面构建多孔微纳结构增加波纹填料粗糙度的方法来提高聚丙烯材料亲水性。LEHNER^[80]研究了一种新型塑料填料,该填料采用网格状分布结构,较散堆填料具有更高的效率,较金属填料更易于安装。

板式换热器设计优化。基于化学吸收法的碳捕集技术,贫富液换热器是影响再生能耗的关键设备之一,高传热系数、低换热端差的板式换热器是降低再生能耗的重点研究方向。研究表明,通过优化板式换热器关键设备参数,如波纹长度、深度、波纹倾斜角等,可以有效提高传热系数,当波纹长度/波纹深度=2.73,波纹倾斜角达到 66.5 时,传热性能最优^[81]。此外,通过改变换热器的表面形态,也可以提高换热系数,如粗化表面、波纹表面等。在面对火电厂复杂烟气环境下,董文峰^[56]提出了全焊接板式贫富液换热器,并且测试了在 30% MEA-H₂O 体系

中换热器的热工性能,研究了 30% MEA 吸收系统贫富液换热器最优端差,并分析了吸收剂黏度对贫富液换热器影响。

2 碳捕集技术工业示范应用介绍

2.1 燃烧前碳捕集技术工业应用介绍

在工业示范方容量的燃烧前二氧化碳捕获系统。这个示范项目的捕集系统利用面,2012 年中国首套 IGCC 电站(华能天津煤气化发电有限公司)投产运行,2015 年基于 IGCC 的 6 万~10 万 t CO₂ 捕集系统装置配套建设完成,该项目是中国最大甲基二乙醇胺(MDEA)法来吸收 H₂S 和 CO₂ 并将它们分离;经过压缩、氨冷和低温精馏处理后,得到的粗 CO₂ 产品气转化为纯度更高的液体 CO₂,用于进行驱动石油提取和地质封存^[82]。

2.2 富氧燃烧技术工业应用介绍

华中科技大学联合东方锅炉和四川空分设备集团,在 2011 年和 2015 年分别在湖北省武汉市和应城市建立了全国首个 3 MWth 富氧燃烧中试试验平台和 35 MWth 富氧燃烧工程示范平台。该项目开发了关键设备,如富氧燃烧煤粉锅炉、燃烧器等,获取了富氧燃烧技术关键参数,如温度分布、常规及非常规污染物排放特性、关键参数动态特性以及初步控制方法等重要试验数据和经验,此外,试验结果显示该平台捕获烟气中二氧化碳浓度可达 82.7%。

东南大学成功建设了全球首个能够实现烟气循环的 50 kWth 循环流化床(CFB)燃烧试验平台,并且与巴布科克-威尔科克斯公司(B&W)共同搭建了一个 2.5 MWth 的 CFB 富氧燃烧实验装置。同时,中国科学院工程热物理研究所还构建了一个 1 MWth CFB 设备。此外,意大利国家电力公司以及美国气体技术公司已经各自开始进行 5 MWth 的水煤浆以及 1 MWth 的 CFB 压缩富氧燃烧的中试研究,旨在将碳捕获的成本降低至每吨二氧化碳 25~30 美元。

2.3 燃烧后碳捕集技术工业应用介绍

燃烧后 CO₂ 捕集技术是工业示范工程中应用最广泛的碳捕集方法,并且目前仅有化学吸收法实现了大规模工业化示范应用。

据统计,截至 2021 年,全球范围内已有超过 400 个 CCUS 项目,并且存在 65 座商业化的 CCS 设施。此外,这些正在运作的 CCS 设施每年能够捕获并永久性地存储大约 4 000 万 t 的二氧化碳。目前,包括正在运行、建设和规划中的项目,共有 43 个

大型综合项目,它们的年捕获量均超过 40 万 t。这些项目的 62% 的捕获量主要集中在北美和欧洲,紧随其后的是澳大利亚和中国。2014 年,加拿大建造的 Boundary Dam 项目是世界范围内第 1 个大型商业燃烧后碳捕集项目,采用的可再生胺吸收剂为壳牌 Cansolv^[83],截至 2018 年 3 月,该设施已捕获 200 万 t CO₂。Petra Nova 项目采用液胺溶剂吸收碳捕集技术,吸收剂为三菱的 KS-1 溶剂^[84],每年可针对 240 MW 的燃煤电厂捕集 140 万 t 二氧化碳^[85]。国外大型燃烧后碳捕集示范工程项目建设及运行情况见表 4。

表 4 国外大型燃烧后碳捕集示范工程项目建设及运行情况^[85]

项目	国家	吸收能力/ (万 t · a ⁻¹)	运行 年份
Boundary Dam	加拿大	100	2014
Petra Nova	美国	140	2016
德州清洁能源项目	美国	220	2019
Bow City	加拿大	100	2019
C GEN	英国	250	2019
Korea-CCS 1	韩国	100	2018
美国 SRI 公司项目	美国-挪威	10	2019

中国燃烧后碳捕集技术还处于中试和工业示范阶段,截止 2023 年 12 月,我国已投运和正在开发的 10 万 t 级及以上的 CCS/CCUS 项目有 41 个,捕集能力 300 万 t/a,11 个二氧化碳地质利用与封存项目规模达 182.1 万 t/a,其中 EOR 的二氧化碳利用规模约为 154 万 t/a。我国已投用煤电 CCUS 项目 14 个,总捕集能力约 110 万 t/a。随着国家政策支持,中国 CCUS 技术逐步成熟,示范工程建设会加速推进。国内典型的火电厂化学吸收法碳捕集项目建设情况见表 5。

目前,国内比较典型的火电厂 CCUS 示范项目为国家能源集团分别于 2021 年投产的碳捕集量 15 万 t/a 的国华锦界项目和碳捕集量为 50 万 t/a 的泰州项目。国华锦界 15 万 t/a CO₂ 捕集示范工程,开发了级间冷却、富液分级流、MVR 闪蒸热泵等先进节能工艺技术,研发了适用于复杂燃煤烟气 CO₂ 捕集的低能耗多元复合胺化学吸收剂,研制了高效低成本塑料填料塔、高效板式换热器和高效降膜煮沸器等碳捕集关键设备。国家能源集团泰州 50 万 t/a CCUS 项目,采用自主研发三元复合胺吸收剂,降低吸收剂再生热耗 35% 以上,每吨 CO₂ 捕集热耗小于 2.4 GJ,电耗量小于 90 kWh,干基二氧化碳纯度 99%

表 5 国内典型火电厂化学吸收法碳捕集项目建设情况

工程名称	碳捕集规模 (万 t · a ⁻¹)	工艺技术	气源 CO ₂ 含量/%	封存利用	捕集率/%	投产时间	投资
国家能源集团泰州 50 万 t/a CCUS 项目	50	三元复合胺吸收 剂-化学吸收法	12	驱油、焊接、食品级干冰	>90	2023 年	4.55 亿
陕西国华锦界 CO ₂ 捕集示范项目	15	有机胺-化学吸收法	12	驱油	>90	2021 年	1.5 亿
华能上海石洞口电厂	10~12	有机胺-化学吸收法	13	工业利用与食品	>90	2010 年	1.2 亿
胜利电厂 200 万 t/a 烟气 CO ₂ 捕集与驱油封存工程	3~4	有机胺-化学吸收法	14	EOR	>90	2010 年	1.2 亿
华润电力海丰碳捕集测试平台	2	有机胺-化学吸收 法+膜法	—	—	90	2019 年	9 000 万
浙能兰溪碳捕集与矿化利用集 成示范项目	1.5	两相吸收剂	—	矿化建材	90		
国家电投重庆双槐电厂	1	有机胺-化学吸收法	12	焊接保护气、电厂发 电机氢冷置换	>95	2010 年	1 235 万
华能北京高碑店电厂	0.3	有机胺-化学吸收法	12.6~14.2	—	>85	2009 年	2 800 万
华能集团宁夏电厂	150	两项吸收剂-化学 吸收法				2024 年	
华能正宁电厂	150			驱油与封存	≥90	2023 年	

以上,二氧化碳完全成本 250 元/t 以下。该项目是目前亚洲在运碳捕集规模最大的煤电 CCUS 项目。

3 碳捕集技术未来发展方向

随着《联合国气候变化框架公约》和碳中和目标的提出,CCUS 作为减碳固碳技术,已成为多个国家碳中和行动计划的重要组成部分。近年来,我国 CCUS 技术发展迅速,但部分先进技术尚处于研究阶段,如化学吸收法碳捕集技术,国际上已处于商业化应用阶段,我国目前在工业示范阶段。根据我国已投运 CCUS 示范项目净减排成本统计数据,电力行业碳捕集能耗为 1.6~3.2 GJ/t CO₂,净减排成本为 180~730 元/t CO₂,我国 CCUS 技术推广依然面临着高能耗、高成本的挑战。此外,“双碳”背景下,火电机组作为电力系统的“压舱石”,调峰已成为日常,现有自动化控制水平无法满足机组频繁深度调峰时碳捕集系统的控制需求。

基于燃烧后化学吸收法碳捕集技术发展现状,CCUS 技术减排成本的降低和胺法脱碳系统自动化发展是未来行业重点突破方向。碳捕集成本降低关键环节为高效低能耗吸收剂的研发和节能工艺的优化。

3.1 高效低能耗吸收剂的研发

在研发化学吸收剂的过程中,高吸收速度、高吸收能力、低再生能源消耗、低腐蚀性和低降解性被视为关键技术指标,这些特性不仅是化学吸收剂研发

的重点,同时也是开发低能耗 CO₂ 捕集技术的核心^[86-87]。目前,吸收剂的研发方向主要为新型复合吸收剂、相变吸收剂和离子液体吸收剂。新型复合吸收剂以传统吸收剂为基础进行改进,保留原吸收剂良好的吸收性能,同时降低再生能耗,现阶段最具有商业化应用价值,但吸收剂再生能耗降低幅度有限,目前相关数据显示最低再生能耗能达到 2.1 GJ/t CO₂,整体经济性不高。离子液体吸收剂采用高吸收性能、低比热容的离子型溶剂来降低再生能耗,存在稳定性差,黏度大和价格高等缺点,距离商业化应用还有一段距离。相变吸收剂在吸收 CO₂ 之后,会因体系的极性改变、亲水性调整、离子强度变动或氢键强度的转变而触发分相过程,再生能耗可降至 1.61~2.87 GJ/t CO₂,是有潜力的低能耗 CO₂ 捕集技术之一,并且相变吸收剂已在浙能兰溪碳捕集与矿化利用集成示范项目应用,在未来具有较大商业化应用潜力。

未来相变吸收剂的研发重点有以下几个方面:
① 对 CO₂ 被相变吸收剂吸附后的分层机制、动力学特性、热力学性质等基本理论进行研究。
② 研发抗降解剂、分相促进剂、扩容剂等,提升相变吸收剂的性能和使用寿命。
③ 相比采用传统有机胺吸收剂的碳捕集技术,相变吸收剂存在分层相变机制,吸收剂工艺流程较为复杂,需要对其在长时间运行中的稳定性进行全面研究,以满足大型示范项目稳定运行需求。
④ 针对相变吸收剂的特点,研发适配的节

能降耗工艺,综合降低系统能耗。

3.2 节能降耗工艺的研发

目前,传统化学吸收法碳捕集技术发展的瓶颈在于建设成本高、系统运行能耗高。基于化学吸收法的碳捕集系统投资成本主要与吸收塔、解吸塔、换热器等关键设备尺寸及性能有关,系统的运行能耗中再生能耗(蒸汽)占总运行成本的70%,再生能耗除了受吸收剂影响,工艺流程也影响整体的再生能耗。目前碳捕集系统级间冷却工艺+富液分级流工艺+MVR闪蒸技术三大节能工艺是大型示范化工程项目的主流节能降耗手段,在此基础上,主流节能技术有待进一步挖掘。

未来节能降耗工艺的发展方向主要有以下几方面:①通过高效利用火电厂热源,采用火电厂余热及低品位蒸汽匹配等技术,以进一步降低系统能耗水平。②使用清洁能源与碳捕集系统耦合,采用外部能源的输入,降低系统本身热源的需求量,降低系统的再生能耗。③开发低成本、高传热设备以降低碳捕集系统建设成本。吸收反应中,吸收塔内高效的气液传质组件;解吸反应中,稳定的热源供给、解吸塔内高效的催化填料、快速的传热强化设备等将有助于构建高效的CO₂吸附-解吸专用设备,对降低碳捕集过程能耗和成本有一定助力。

3.3 脱碳系统自动化发展

在实际机组运行过程中,由于发电循环涉及启动、停止以及调峰负荷的变化,脱碳系统所需的再生热能会呈现动态波动。此外,环境条件和电厂运行的动态因素也会对处理过程中的烟气成分和流量产生影响。

未来脱碳系统自动化重点发展方向为研究在变负荷工况下,碳捕集系统关键参数的动态响应;在动态环境下,控制策略模型的研究,实现对碳捕集系统的整体经济优化控制。

4 结 论

1)CO₂捕集技术主要包括燃烧前捕集、富氧燃烧和燃烧后捕集,经过对比分析,最成熟的碳捕集技术是燃烧后捕集。燃烧前碳捕集技术,投资成本高,可靠工艺系统复杂,仅适用于新建电厂。富氧燃烧具有较大的发展潜力,目前技术投资成本和运行成本较高,距大型示范应用还有一定距离。

2)目前,燃烧后碳捕集技术包括化学吸收法、吸附分离法、膜分离法和低温分离法。经过对比分析,应用最广泛的是化学吸收法,该技术已实现商业化工业应用。我国现有和短期(2030年前)新建的

燃煤电厂碳捕集应以燃烧后化学吸收法为主要技术路线。

3)化学吸收法虽在工业中有不同规模的应用,但普遍存在综合能耗高、腐蚀性强、投资高、自动化水平低等问题。未来,在高效低能耗吸收剂的研发(重点为相变吸收剂)、节能降耗工艺的研发、脱碳系统自动化发展是重点突破方向。

(4)近年来,中国在碳捕集领域发展迅速,但与国际整体发展进度相比,还存在一定差距。以化学吸收法为例,尽管已经投运或建设一批示范工程项目,但在和大型百万吨级工业示范和下游产品气利用方面仍显经验不足。因此,在百万吨级CCUS全产业链示范工程项目的建设上还亟需发力。

参考文献:

- [1] FIASCHI D, LOMBARDI L. Integrated gasifier combined cycle plant with integrated CO₂-H₂S removal: performance analysis, life cycle assessment and exergetic life cycle assessment[J]. International Journal of Thermodynamics, 2001, 5(1): 13-24.
- [2] 何文波.火电厂富氧燃烧项目价值评估与发展战略建议[D].武汉:华中科技大学,2015.
- [3] ZHENG Chuguang, LIU Zhaohui, XIANG Jun, et al.Fundamental and technical challenges for a compatible design scheme of oxyfuel combustion technology[J].Engineering,2015,1(1):139-149.
- [4] LISZKA M, ZIEBIK A. Coal-fired oxy-fuel power unit-process and system analysis[J]. Energy,2010,35:943-951.
- [5] KAKARAS E, KOUM ANAKOS A, DOUKELIS A. Simulation of a Greenfield oxyfuel Lignite-fired power plant[J].Proceedings of ECOS,2006:905-912.
- [6] OKAWA M, KIMURA N, KIGA T, et al. Trial design for a CO₂ recovery power plant byburning pulverized coal in O₂/CO₂ [J]. Energy Conversion and Management, 1997,38(S1):S123-S127.
- [7] ANDERSSON K, JOHNSON F, STROMBERG L. Large scale CO₂ capture applying the concept of O₂/CO₂ combustion to commercial process data [J]. VGB Powertech, 2003, 83(10): 29-33.
- [8] MOLBURG J C, DOCTOR R D, BROCKMEIER N F S P. CO₂ capture from Pc boilers with O₂-firing[C]//Eighteenth annual international Pittsburgh coal conference. Newcastle: [s. n.], 2001.
- [9] SINGH D, CROISSET E, DOUGLAS P L, et al. Techno-economic study of CO₂ capture from an existing coal-fired power plant:MEA scrubbing vs. O₂/CO₂ recycle combustion[J]. Energy Conversion and Management,2003,44(19):3073-3091.
- [10] KANNICHE M,GROS-BONNIVARD R, JAUD P, et al. Pre-combustion, post-combustion andoxy-combustion in thermal power plant for CO₂ capture [J]. Applied Thermal Engineering,2010, 30: 53-62.
- [11] 煤燃烧的CO₂减排技术与污染物协同脱除[D].武汉:华中科技大学,2007.
- [12] 熊杰.氧燃烧系统的能源-经济-环境综合分析评价[D].武

- 汉:华中科技大学,2011.
- [13] 孔红兵.600MW 富氧燃烧系统建模分析优化及经济性评估 [D].武汉:华中科技大学,2011.
- [14] 陈春香,马晓茜.燃煤机组富氧燃烧发电的生命周期评价[J].中国电机工程学报,2009,29(s1):82-87.
- [15] 方梦祥,周旭萍,王涛,等.CO₂ 化学吸收剂[J].化学进展,2015,27(12):1808-1814.
- [16] KENARSARI S D, YANG D, JIANG G, et al. Review of recent advances in carbon dioxide separation and capture[J]. RSC Advances, 2013, 3(45):22739-22773.
- [17] VEGA F, BAENA-MORENO F M, GALLEGO FERNÁNDEZ, et al. Current status of CO₂ chemical absorption research applied to CCS: Towards full deployment at industrial scale[J]. Applied Energy, 2020, 260.
- [18] ROCHELLE GT, WU Y, CHEN E, et al. Pilot plant demonstration of piperazine with the advanced flash stripper[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2019, 84: 72-81.
- [19] 王涛,刘飞,方梦祥,等.两相吸收剂捕集二氧化碳技术研究进展[J].中国电机工程学报,2021,41(4):1186-1196.
- [20] 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.
- [21] IDEM R, WILSON M, TONTIWACHWUTHIKUL P, et al. Pilot plant studies of the CO₂ capture performance of aqueous MEA and mixed MEA/MDEA solvents at the university of regina CO₂ capture technology development plant and the boundary dam CO₂ capture demonstration plant [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2006, 45(8):2414-2420.
- [22] CONWAY W, BRUGGINK S, BEYAD Y, et al. CO₂ absorption into aqueous amine blended solutions containing Monoethanolamine (MEA), N,N-dimethylethanolamine (DMEA), N,N-diethylethanolamine (DEEA) and 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) for post-combustion capture processes [J]. Chemical Engineering Science, 2015(126):446-454.
- [23] ZHANG R, ZHANG X, 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.
- [24] NWAHOHA C, SAIWAN C, SUPAP T, et al. Carbon dioxide (CO₂) capture performance of aqueous tri-solvent blends containing 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) and methyl diethanolamine (MDEA) promoted by diethylenetriamine (DETA) [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2016(53):292-304.
- [25] LI Y N, CHENG J, HU L Q, et al. Regulating crystal structures of EDA-carbamates in solid-liquid phase-changing CO₂ capture solutions [J]. Fuel, 2019, 252:47-54.
- [26] 张卫凤,周武,王秋华.相变吸收捕集烟气中 CO₂ 技术的发展现状[J].化工进展,2022,41(4):1-16.
- [27] WANG N, PENG Z Q, GAO H X, et al. New insight and evaluation of secondary amine/N-butanol biphasic solutions for CO₂ capture: Equilibrium solubility, phase separation behavior absorption rate, desorption rate, energy consumption and ionspecies [J]. Chem Eng J, 2022, 431: 113912.
- [28] LI X, LIU J, JIANG W, et al. Low energy-consuming CO₂ capture by phase change absorbents of amine/alcohol/H₂O [J]. Separation and Purification Technology, 2021, 275: 119181.
- [29] 杨叶.基于 MDEA 的 CO₂ 相变吸收剂的实验研究 [D].北京:北京化工大学,2016.
- [30] 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.
- [31] 刘飞.胺基两相吸收剂捕集二氧化碳机理研究 [D].杭州:浙江大学,2020.
- [32] LI Y Y, LIU C J, PARNAS R, et al. The CO₂ absorption and desorption performance of the triethylenetetramine + N,N-diethylethanolamine + H₂O system [J]. Chinese J Chem Eng. 2018, 26(11):2351-2360.
- [33] 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]. Appl Energy, 2022, 324: 119570.
- [34] 郭晖.有机胺/醇醚非水混合体系吸收 CO₂ 过程特性研究 [D].石家庄:河北科技大学,2019.
- [35] BAI L J, LU S J, ZHAO Q Z, et al. Low-energy-consuming CO₂ capture by liquid-liquid biphasic absorbents of EMEA/DEEA/PX [J]. Chem Eng J, 2022, 450: 138490.
- [36] WANG L D, YU S H, LIQ W, et al. Performance of sulfolane/DETA hybrids for CO₂ absorption: Phase splitting behavior, kinetics and thermodynamics [J]. Appl Energy, 2018, 228: 568-576.
- [37] 刘雨诗,李晶晶,唐晓东.离子液体吸收二氧化碳研究进展 [J].精细石油化工,2023,40(6):80-84.
- [38] ZHOU X J, WEBER J, YUAN J Y, Poly(ionic liquid)s: Platform for CO₂ capture and catalysis [J]. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 2019, 16: 39-46.
- [39] ZHUGE Y X, XU D M, ZHENG C H, et al. An ionic liquid modified diarylethene: synthesis, properties and sensing cyanide ions [J]. Analytica Chimica Acta, 2019, 1079: 153163.
- [40] CHEN Y F, ZHANG Y Y, YUAN S J, et al. Thermodynamic study for gas absorption in choline-2-pyrrolidine carboxylic acid + polyethylene glycol [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2016, 61(10):3428-3437.
- [41] SARAVANAMURUGAN S, KUNOV-KRUSE A J, FEHRMANN R, et al. Amine-Functionalized amino acid-based ionic liquids as efficient and high capacity absorbents for CO₂ [J]. Chemosuschem, 2014, 7(3):897-902.
- [42] TOORCHI R S, RAD-MOGHADAM K. A sulfonating ionic liquid for one-pot pseudo four-component synthesis of novel 3-chlorosulfonyl-8-sultones: A novel class of fluorescent compounds [J]. Tetrahedron, 2018, 74(30):4047-4052.
- [43] BICA K, DEETLEFS M, SCHRÖDER C, et al. Polarisabilities of alkylimidazolium ionic liquids [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2013, 15(8):2703-2711.
- [44] RAO S S, G S P. CO₂ absorption using fluorine functionalized ionic liquids: interplay of hydrogen and σ -hole interactions [J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2016, 120(8):1243-1260.
- [45] 胡艺.常规咪唑离子液体吸收 CO₂ 的热力学性能研究 [D].武汉:华中科技大学,2018.

- [46] ZHAO M, BAN Y J, YANG W S. Assembly of ionic liquid molecule layers on metal-organic framework-808 for CO₂ capture[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 439:135-650.
- [47] ARAQUE J C, YADAV S K, SHADECK M, et al. How is diffusion of neutral and charged tracers related to the structure and dynamics of a room-temperature ionic liquid: Large deviations from stokes-einstein behavior explained [J], *The Journal of Physical Chemistry B*, 2015, 119(23): 7015-7029.
- [48] ABBOTT A P, CAPPER G, DAVIES D L, et al. Novel solvent properties of choline chloride/urea mixtures [J]. *Chemical Communications*, 2003, 39(1): 70-71.
- [49] GARCIA G, ATILHAN M, APARICIO S. Interfacial properties of deep eutectic solvents regarding to CO₂ capture [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2015, 119(37):21413-21425.
- [50] DOYLE K A, MURPHY L J, PAULA Z A, et al. Characterization of a new ionic liquid and its use for CO₂ capture from ambient air: studies on solutions of diethylenetriamine (DETA) and [DETAH]NO₃ in polyethylene glycol [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, 54(36): 8829-8841.
- [51] SUN S Y, NIU Y X, XU Q, et al. Efficient SO₂ absorptions by four kinds of deep eutectic solvents based on choline chloride [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, 54(33): 8019-8024.
- [52] GARCIA G, APARICIO S, ULLAH R, et al. Deep eutectic solvents: physicochemical properties and gas separation applications [J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29(4):2616-2644.
- [53] SZE L, PANDEY S, RAVULA S, et al. Ternary deep eutectic solvents tasked for carbon dioxide capture [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2014, 2(9):2117-2123.
- [54] WANG Z, WANG Z H, HUANG X, et al. Deep eutectic solvents composed of bio-phenol-derived superbase ionic liquids and diethylene glycol for CO₂ capture [J]. *Chemical Communications*, 2022, 58(13):2160-2163.
- [55] ZHANG Z, BORHANI T N, OLABI A G. Status and perspective of CO₂ absorption process [J]. *Energy*, 2020, 205.
- [56] 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.
- [57] LE MOULLEC Y, NEVEUX T, AL AZKI A, et al. Process modifications for solvent-based post-combustion CO₂ capture [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 31: 96-112.
- [58] AROONWILAS A, VEA WAB A. Heat recovery gas absorption process; WO 2007/07004 A1 [P]. 2007.
- [59] WALTERS M S, EDGAR T F, ROCHELLE G T. Dynamic modeling and control of an intercooled absorber for post-combustion CO₂ capture [J]. *Chemical Engineering and Processing-process Intensification*, 2016, 107: 1-10.
- [60] HEMMATI A, RASHIDI H. Optimization of industrial intercooled post-combustion CO₂ absorber by applying rate-based model and response surface methodology (RSM) [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 121(B):77-86.
- [61] SANPASERTPARNICH T, IDEM R, TONTIWACHWUTHIKUL P. CO₂ absorption in an absorber column with a series of intercooler Circuits 1 [C] // 10th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, 2011, 4:1676-1682.
- [62] LI K, COUSINS A, YU H, et al. Systematic study of aqueous monoethanolamine-based CO₂ capture process: Model development and process improvement [J]. *Energy Science & Engineering*, 2016, 4(1):23-39.
- [63] COUSINS A, WARDHAUGH L T, FERON P H M. A survey of process flow sheet modifications for energy efficient CO₂ capture from flue gases using chemical absorption [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, 5(4): 605-619.
- [64] OH S, BINNS M, CHO H, et al. Energy minimization of MEA-based CO₂ capture process [J]. *Applied Energy*, 2016, 169: 353-362.
- [65] COUSINS A, COTTRELL A, LAWSON A, et al. Model verification and evaluation of the rich-split process modification at an Australian-based post combustion CO₂ capture pilot plant [J]. *Greenhouse Gases - Science and Technology*, 2012, 2(5): 329-345.
- [66] YAN S, CUI Q, XU L, et al. Reducing CO₂ regeneration heat requirement through waste heat recovery from hot stripping gas using nanoporous ceramic membrane [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019, 82:269-280.
- [67] CUI Q, LIU S, XU L, et al. Modification of rich-split carbon capture process using ceramic membrane for reducing the reboiler duty: Effect of membrane arrangements [J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 235, 116148.
- [68] LIU J. Investigation into an energy-saving mechanism for advanced stripper configurations in post-combustion carbon capture Author links open overlay pane [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2020, 108:43-54.
- [69] ULLAH A, SOOMRO M I, KIM W. Ammonia-based CO₂ capture parameters optimization and analysis of lean and rich vapor compression processes [J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 217: 8-16.
- [70] KARIMI M, HILLESTAD M, SVENDSEN H F. Capital costs and energy considerations of different alternative stripper configurations for post combustion CO₂ capture [J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2011, 89(8AS1):1229-1236.
- [71] FEMANDEZ E S, BERGSMAN E J, MERCADER F D M, et al. Optimisation of lean vapour compression (LVC) as an option for post-combustion CO₂ capture: Net maximisation [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2012, 111: S114-S121.
- [72] SULTAN H, BHATTI U H, MUHAMMAD H A, et al. Modification of post-combustion CO₂ capture process: A techno-economic analysis [J]. *Greenhouse Gases-science and Technology*, 2021, 11(1):165-182.
- [73] FOSBOL P L, NEERUP R, ALMEIDA S, et al. Results of the fourth Technology Centre Mongstad campaign: LVC testing [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019, 89: 52-64.
- [74] REN X Y, ZENG G M, TANG L, et al. The potential impact on the biodegradation of organic pollutants from composting

- technology for soil remediation [J]. *Waste Management*, 2018, 72:138-149.
- [75] OLUJIE 2, JOECKE M, SHILKIN A, et al. Equipment improvement trends indistillation1. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2009, 48(6):1089-1104.
- [76] MELLAPAK CCTM. Structured packing for CO₂ capture[EB/OL]. https://www.sulzer.com/zh-cn/china/shared/produ-cts/mellapakcc_capture.
- [77] KANG S, CHUN B, KIM S S. Surface modification of polypropylene membrane by low-temperature plasma treatment [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2001, 81(6):1555-1566.
- [78] XIE Y, YU H, WANG S, et al. Improvement of antifouling characteristics in abioreactor of polypropylene microporous membrane by the adsorption of Tween20[J]. *Journal of Environmental Sciences*. 2007, 19(12):1461-1465.
- [79] CISZEWSKI A, RYDZYNSKA B. Studies on self-assembly phenomena of hydrophilization of microporous polypropylene membrane by acetone aldol condensation products: New separator for high-power alkaline batteries[J]. *Journal of Power Sources*. 2007, 166(2):526-530.
- [80] LEHNER M, HOFIMANN K, GEIPEL W. Hydrodynamic and mass transfer characteristic of a novel grid-structured plastic packing [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2011, 47(8):1035-1041.
- [81] KUMAR B, SONI A, SINGH S N. Effect of geometrical parameters on the performance of chevron type plate heat exchanger[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, 91:126-33.
- [82] 樊强, 许世森, 刘沅, 等. 基于 IGCC 的燃烧前 CO₂ 捕集技术应用与示范[J]. *中国电力*, 2017, 50(5):6.
- [83] STEPHENNE K. Start-up of world's first commercial post-combustion coal fired CCS project: Contribution of shell cansolv to SaskPower boundary dam ICCS project [J]. *Energy Procedia*, 2014, 63(32):6106-6110.
- [84] MANTRIPRAGADA H, ZHAI H, RUBIN E S. Boundary dam or petra nova-Which is a better model for CCS [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019, 82:59-68.
- [85] PATEL P. Can carbon capture and storage deliver on its promise [J]. *MRS Bulletin*, 2017, 42(3):188-189.
- [86] ZHANG Z E, WANG T, BLUNT M J, et al. Advances in carbon capture, utilization and storage [J]. *Applied Energy*, 2020, 278:115627.
- [87] LIANG Z W, FU K Y, ID EM R, et al. Review on current advances, future challenges and consideration issues for post-combustion CO₂ capture using amine-based absorbents [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2016, 24(2):278-328.