

DOI: 10.19666/j.rlfed.202502020

吸附法直接空气碳捕集技术产业化发展

陈彦霖^{1,2}, 郑家乐¹, 薛明¹, 魏炜¹, 周爱国¹, 葛天舒²

(1. 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司, 北京 102206;

2. 上海交通大学制冷与低温工程研究所, 上海 200240)

[摘要] 直接空气碳捕集 (direct air capture, DAC) 技术在近 10 年来蓬勃发展, 目前已经从实验室研究阶段, 逐步发展为产业化。吸附法比吸收法 DAC 的应用前景更广阔, 因此目前全球范围内已经有一些企业推出基于吸附法的 DAC 示范项目。然而, 现研究对于这些吸附法 DAC 企业及项目的介绍较少, 未形成较全面的研究。鉴于上述原因, 通过现有的文献、企业网站资料, 调研一些代表性的吸附法 DAC 企业及其技术、项目, 并对其中的重点部分进行介绍; 此外, 将这些企业的装置类型, 根据设备布置方式分为集中式装置和集成式装置, 并介绍这 2 类装置的特点。通过总结 DAC 企业及技术特点, 发现大部分企业致力于降低运行及投资成本, 因此提出了未来产业化过程中降低成本的方法, 并分析了其效果。

[关键词] 直接空气碳捕集; 吸附; DAC; 产业化; 成本

[引用本文格式] 陈彦霖, 郑家乐, 薛明, 等. 吸附法直接空气碳捕集技术产业化发展[J]. 热力发电, 2025, 54(6): 178-185.
CHEN Yanlin, ZHENG Jiale, XUE Ming, et al. Industrialization development of direct air carbon capture by adsorption[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(6): 178-185.

Industrialization development of direct air carbon capture by adsorption

CHEN Yanlin^{1,2}, ZHENG Jiale¹, XUE Ming¹, WEI Wei¹, ZHOU Aiguo¹, GE Tianshu²

(1. CNPC Research Institute of Safety and Environmental Technology, Beijing 102206, China;

2. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Direct air carbon capture (DAC) technology has been booming in the past decade, and now it has gradually developed from laboratory toward commercial device. Because the adsorption DAC is more promising than absorption DAC, some companies have launched DAC demonstration projects based on adsorption. However, there is relatively little introduction to these companies and projects based on adsorption DAC in current research, and a comprehensive study has not yet been formed. In view of the above reasons, some representative companies owning adsorption DAC technologies and their projects are investigated through existing literatures and their corporate websites, and the key contents are focused. In addition, the device types of these enterprises are divided into centralized devices and integrated devices according to the arrangement of equipment, and the characteristics of these two types of devices are introduced. By summarizing the characteristics of DAC enterprises and technologies, it is found that most enterprises are committed to reducing operation and investment costs, so the possible cost reduction methods in the future industrialization process are put forward and the effects are analyzed.

Key words: direct air carbon capture; adsorption; DAC; industrialization; cost

化石燃料是目前全球能源不可或缺的一部分, 根据统计, 全球 80% 以上的一次能源消费是来自于化石燃料^[1]。然而, 燃烧化石燃料会产生大量的 CO₂, 并

导致大气中的温室气体快速增加, 加剧气候问题。为了解决全球气候问题, 直接空气碳捕集 (direct air capture, DAC) 技术近年来备受瞩目, 其能够有效减

收稿日期: 2025-02-18

基金项目: 中国石油集团科技项目 (2022DJ6607); 国家自然科学基金项目 (52376011)

Supported by: Science and Technology Project of China Petroleum Group (2022DJ6607); National Natural Science Foundation of China (52376011)

第一作者简介: 陈彦霖 (1999), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为直接空气碳捕集技术, ylc1101@sjtu.edu.cn。

通信作者简介: 葛天舒 (1982), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为大气中水碳调节技术, baby_wo@sjtu.edu.cn。

少难以减排行业、移动排放源（交通运输）等向环境中排放的 CO₂ 量^[2]。固体吸附法与膜分离、吸收法等工艺相比，具有较低的能耗、较高的分离效率，因此成为目前主流的 DAC 技术^[3]。尽管近年来 DAC 的研究蓬勃发展，但是在全球范围内，DAC 的商业化应用较少，尚未大规模部署。根据国际能源总署（international energy agency, IEA）统计^[4]，截至 2024 年 4 月，全球共有 27 座 DAC 工厂，主要分布于北美、欧洲等，而且只有一部分的工厂作为商业用途，其余的则是实验和示范项目。一般来说技术成熟等级为 TRL 8-9 级才能视为商业化，目前全球范围内仅有 Climeworks 一家 DAC 公司达到该水平^[5]。

根据 Web of Science 搜索与 DAC 相关的文献，高被引综述共有 27 篇。这些文章中，有 16 篇涉及材料、10 篇涉及工艺流程、10 篇涉及 LCA/TEA、8 篇涉及 CO₂ 利用，仅有 4 篇提到 DAC 企业及相关项目发展。由此可知，目前的 DAC 综述大多聚焦于材料、工艺流程、经济性分析等^[6-7]，关于吸附法 DAC 企业发展及相关项目介绍较少。目前的 DAC 技术初创公司是未来 DAC 项目开发的关键参与方，能够在一定程度上代表未来 DAC 技术和产业链的发展方向，具有参考意义。吸附法是未来 DAC 研究的重点方向之一，目前大部分的 DAC 初创公司采用吸附法进行碳捕集。因此，本文调研当今具有代表性的吸附法 DAC 公司，介绍各家公司的 DAC 项目，并提出未来 DAC 技术可能的发展方向。根据装置的布置形式作为分类标准，分成集中式装置和集成式装置，这种分类方法更能够反映不同 DAC 公司的技术特色。

1 吸附法 DAC 吸附剂介绍

1.1 碱（土）金属基吸附剂

瑞士苏黎世联邦理工学院的 Steinfeld 团队，使用固体碱（土）金属作为吸附剂，从大气中捕集 CO₂，并基于此类吸附剂循环进行热力学、动力学分析^[8]。Steinfeld 和 Nikulshina 等人^[9]采用 CaO 的碳化、煅烧热化学循环进行碳捕集，在碳化阶段通入蒸气参与反应，并通过中间产物 Ca(OH)₂ 提高反应速率。结合集中式太阳能提供高温热源，通过连续的碳酸钙碳化和煅烧，从环境空气中连续捕集 CO₂。碳化阶段的反应温度为 365~400 °C、煅烧阶段温度为 800~875 °C。

鉴于 Ca 基吸附剂解吸温度高的缺点，Steinfeld 团队^[10]开展 NaOH 吸附剂捕集 CO₂ 的研究。但对于

NaOH 捕集 CO₂ 的研究显示，其碳化程度不高于 9%，且反应速率慢，使得 Na 基吸附剂捕集 CO₂ 的应用受阻。综上，碱性固体吸附剂在 DAC 领域中的应用，主要还是以 Ca 基吸附剂为主，并且由于能耗高、再生温度高等问题，使得其应用受阻。目前，使用这类技术路径的代表性企业有美国的 Heirloom 公司，使用 Ca 基吸附剂进行碳捕集^[11]。

1.2 物理吸附剂

沸石、金属有机框架材料（MOFs）等多孔材料也被广泛用于 DAC 领域，由于此类吸附剂的吸附机理是依靠 CO₂ 和吸附剂之间的较弱物理相互作用，因此被称为物理吸附剂。虽然物理吸附剂具有吸附动力学快、再生能耗低等优点，但是吸附选择性弱，不容易将低浓度 CO₂ 从空气分离^[12]。Kumar 等人^[13]在潮湿环境下测试 SIFSIX-3-Ni、HKUST-1、Mg-MOF-74 和沸石 13X 4 种物理吸附剂的水、CO₂ 吸附量，其中 CO₂ 吸附量不超过 8%，证明物理吸附剂中存在水和 CO₂ 的竞争吸附作用。此外，部分 MOFs 在潮湿环境下会发生降解，使得比表面积下降，影响吸附能力，且 MOFs 的成本较高，不易规模化使用。因此，物理吸附剂在 DAC 的应用受限，使用物理吸附剂的代表性企业是美国的 Carbon Capture 公司，该公司采用沸石和变温真空循环（temperature vacuum swing adsorption, TVSA）的再生方式。

1.3 胺基吸附剂

在 DAC 吸附剂的研究中，由于胺基吸附剂低 CO₂ 浓度条件下的吸附选择性好，因此成为研究的热点。胺基吸附剂的合成方法主要有 3 种：第 1 种是浸渍法，通过物理作用力将有机胺与载体结合；第 2 种是嫁接法，通过共价键将有机胺与载体结合；第 3 种方法是原位聚合法，通过共价键将有机胺聚合于载体上^[8]。浸渍法和嫁接法合成的胺基吸附剂是目前研究最多的 2 类：浸渍胺吸附剂虽然有吸附量高的优点，但是稳定性较差；嫁接法吸附剂稳定性较好，但吸附量通常较低^[14]。胺基吸附剂的再生温度较低，具有良好的应用前景，现在使用胺基吸附剂的 DAC 公司有 Climeworks、Global Thermostat 等。

1.4 变湿吸附剂

2009 年 Lackner 教授^[15]提出了变湿吸附剂的概念，这类吸附剂属于强碱阴离子交换树脂，同时具有季胺基离子官能团。在低湿度环境中，CO₂ 与吸附剂上的碱性基团发生反应，形成 CO₂ 的吸附；在

高湿度环境中,大量 H_2O 会与吸附剂发生反应,释放 CO_2 ,完成吸附剂再生^[16]。这种吸附剂的优点,在于利用水蒸发的自由能作为 CO_2 解吸能量,相较于物理或胺基吸附剂,不需要通过升温进行再生,减少了再生过程所需的能耗,并且能够利用低品位热能进行再生^[17]。目前,使用变湿吸附剂的 DAC 有爱尔兰 Carbon Collect 公司^[18]以及霖和气候科技(北京)有限公司^[19]。

2 代表性 DAC 企业介绍

根据目前 DAC 装置的布置形式,本文提出“集中式装置”概念,其定义为该装置的各部件(如风机、反应器、处理单元等)都只用于该 DAC 装置,不与其他装置共用。目前,全世界的 DAC 公司中,开发吸附法集中式装置的企业包括 Climeworks、Global Thermostat、Carbon Capture 等。

由于 DAC 大多部署在集中式的系统中,需要额外的基础设施以及初始投资成本,不利于规模化推广。有研究者认为,若利用现有基础设施(如冷却塔)的气流,搭建耦合的 DAC 系统,将是一个潜在的解决方案。本文将这类型 DAC 系统分类为“集成式装置”。An 等人^[20]提出一种分布式 DAC 系统,利用商用屋顶暖通空调(HVAC)装置捕集 CO_2 。据统计,全美国的商业建筑约有 1 500 万个 HVAC 装置,每天都有大量的空气流经这些装置,若将 DAC 系统与其结合,将显著降低其基础设施以及运行成本。现在也有部分企业如 Soletair Power、NeoCarbon、Carbon Reform 等公司,开发这类型的 DAC 装置。

创立于 2009 年的 Climeworks 是目前世界上最成功的 DAC 公司之一。2014 年, Climeworks 的第 1 台样机诞生, CO_2 年捕集量为 1 t^[21]。2017 年, Climeworks 在瑞士 Hinwil 一个废弃物回收设施的屋顶上,打造了世界第 1 座商业化 DAC 工厂 Capricorn, CO_2 年捕集量为 900 t,并利用该设施产生的废热将从空气中捕集的 CO_2 输送至附近的温室作为气肥^[22]。Climeworks 在冰岛建造世界第 1 座捕集与封存相结合的 DAC 工厂 Orca,以及年捕集量 36 000 t 的 DAC 工厂 Mammoth。Mammoth 运行所需的电、蒸气来自地热,通过与冰岛 Carbfix 公司合作,将捕集的 CO_2 加压与水混合后注入地底,混合后的溶液呈酸性,能溶解玄武岩中钙、镁等物质,并与 CO_2 反应形成碳酸盐矿物^[23],最终将 CO_2 封存数千年(图 1^[24])。



图 1 Climeworks Mammoth 装置
Fig.1 The Climeworks Mammoth equipment

Global Thermostat 是由 Graciela Chichilnisky 与 Peter Eisenberger 2 位哥伦比亚大学教授于 2010 年创立,成立初衷是去除大气中的 CO_2 ,并将捕集的 CO_2 作为可再生低碳燃料的合成原料^[25]。在 2024 年,该公司被 Zero Carbon Systems 收购。Global Thermostat 在美国科罗拉多州建立了北美第 1 座千吨级别的 DAC 装置(图 2)^[26],此外 Global Thermostat 还开发了年捕集量为 10 t 的小规模 DAC 装置 T-series,体积为 1 个标准集装箱,因此不受地点限制,能够在任何地方使用,目的为小型商业、试点应用。这种小规模 DAC 装置,已在夏威夷完成试验,用于提高微藻的产量,并使用微藻生产可再生燃料^[27]。



图 2 Global Thermostat 年捕集量千吨级别的示范装置
Fig.2 The demonstration device of Global Thermostat, with an annual CO_2 capture capacity of thousands of tons

Carbon Capture 是一家总部位于洛杉矶的美国 DAC 公司,该公司 Leo Series 装置的每 1 个模块都是标准集装箱大小,年捕集量超过 500 t。Leo Series DAC 系统在美国率先实现了规模化生产, Carbon Capture 位于亚利桑那州的工厂每年能生产 4 000 个 Leo Series 装置(图 3^[28])。Leo Series 装置使用结构化吸附剂,并且是开放式的系统,能够替换不同的吸附剂进行升级,有助于降低成本、解决长期运行后性能下降的问题^[28]。未来, Carbon Capture 将继续往规模化 DAC 的方向发展,根据 Carbon Capture 最新发布的 Bison 计划,将在怀俄明州建造大型 DAC 工厂,该工厂由数个 DAC 模块组成,捕集后的 CO_2 将永久封存在地底^[29]。



图 3 Carbon Capture 的 Leo Series 装置
Fig.3 The Leo Series equipment of Carbon Capture

美国 DAC 企业 Heirloom 创立于 2020 年, 该公司 DAC 技术使用天然碳酸钙 (CaCO_3) 作为吸附剂, 再生阶段 CaCO_3 加热后会产生 CaO 、释放 CO_2 , 将 CaO 与水反应会生产 Ca(OH)_2 , 之后 Ca(OH)_2 能与 CO_2 反应生产 CaCO_3 , 完成 1 个吸附再生过程。碳酸钙在地壳的占比约 4%, 属于一种容易取得的材料, CaCO_3 成本为 10~50 美元/t, 因此能够降低装置的整体成本。Heirloom 公司的反应器, 使用大面积的托盘铺设 Ca(OH)_2 粉末, 然后将托盘垂直堆叠排放, 形成分层的反应器结构, 在减少土地使用的同时增加空气与吸附剂的接触面积。该技术利用自然对流, 吸附过程中不需要额外的风扇, 可以节省吸附过程的能耗。目前, Heirloom 已在美国加州投入 1 座年捕集量 1 000 t CO_2 的 DAC 工厂, 捕集后的 CO_2 永久封存入混凝土, 并作为建筑原料。此外, Heirloom 也与 Capture Point 公司合作, 将捕集后的 CO_2 永久封存 (图 4) [30-31]。

与 Heirloom 采用类似技术路线的还有 Carbon Collect 公司的 Mechanical Tree, 这是一种被动式 DAC 装置, 吸附时装有吸附剂的圆盘垂直升起至 10 m 高, 利用自然风输送环境空气, 相较于其他装置, 不依赖风机进行强制对流, 因此能够降低捕集成本。吸附饱和后圆盘降低至再生室, 解吸体积分数 95% 的 CO_2 产品气 [32]。



图 4 Heirloom 分层反应器
Fig.4 The layer stack reactor of Heirloom

Soletair Power 是一家成立于 2016 年的芬兰碳捕集公司, 其核心技术是将 DAC 和商业建筑的屋顶暖通空调 HVAC 系统集成, 此技术的优点在于降低建筑物的碳足迹、改善室内空气质量等, 并且节省通风能耗。该装置的投资回报率约在 5 年内实现, 同时节省 75% 的能耗, 每年还可以产生 25 个碳信用额 [33]。Soletair Power 公司的 HVAC-DAC 装置使用胺官能化吸附剂, 并采用变温真空再生 TVSA 循环, 其产品气体积分数高达 98.00%~99.99% [34], 有利于 CO_2 的后续利用, 如合成燃料等。此外, 通过计算流体动力学 (CFD) 设计, 该装置能根据吸附剂量, 保持所需气体流速的同时限制压降, 从而允许使用传统风扇 [35], 这有利于降低运行过程的风机能耗 (图 5 [36])。



图 5 Soletair Power 的 HVAC-DAC 集成系统
Fig.5 The HVAC-DAC integrated system of Soletair Power

德国的 DAC 公司 Neo Carbon 于 2022 年, 该公司的技术特点在于 DAC 系统可以安装在工业冷却塔内部, 使用冷却塔的风扇提供气流, 并且利用冷却产生的废热, 最终减少 DAC 的能耗以及成本 [37]。目前, Neo Carbon 公司提出一种“负碳水泥厂”的方案, 采用 DAC 和点源碳捕集结合的方案, 利用水泥厂较高温的废热, 降低 DAC 系统额外所需的能量 [38]。

中国的 DAC 产业化发展起步较晚, 目前只有少数小试、中试规模的示范项目, 尚未出现千吨级别的装置。霖和气候科技公司研发设计基于干湿法的 DAC 示范项目, 可按需提供 1%~99% 体积分数的 CO_2 产气, 年捕集量为 2.7 t [19]。中国石油集团的 DAC 创新团队开发了五步法 S-TVSA 循环技术, 每年能从空气中捕集 1.1 t 的 CO_2 [39]。2024 年, 中能建 (上海) 成套工程有限公司联合上海交通大学, 共同研发攻关国内首台年捕集量 600 t CO_2 的 DAC 装置“CarbonBox”, 成功通过百吨级的满负荷可靠性运行验证, 该装置的模块化设计, 能够满足大规模集中式、分布式及移动式布置, 且 CO_2 产气体积分数高达 99%, 可以用于绿色燃料合成和碳交易服务等领域 [40]。

尽管现在 DAC 的技术已经发展多年,但是其运行成本高、能耗高等问题依然限制其大规模商业化进程。若要大规模推广 DAC, 还需降低每吨 CO₂ 的捕集成本, 根据国际能源总署 IEA 研究, DAC 的资本成本为 1 000~1 500 美元/t(以单位质量 CO₂ 计, 下同), 并且捕集成本为 200~ 600 美元/t, 远高于传统的烟气捕集等碳捕集、利用与封存技术 (carbon capture, utilization and storage, CCUS) 技术^[41]。虽然部分企业的 DAC 成本较低, 例如 Climeworks 公司使用地热产生的蒸气、电力运行 DAC 装置, 因此能够降低运行成本; Soletair Power 公司将 DAC 装置与 HVAC 系统集成, 降低了风机等部件的运行成本; Heirloom 与 Carbon Collect 公司的 DAC 装置使用自然对流使空气与吸附剂接触, 运行过程中不存在风机能耗, 大幅降

低了成本。虽然上述策略能够降低 DAC 装置的运行成本, 但需要与原有系统共用设备, 或者需要使用废热、地热作为再生热源^[23], 其应用较为受限。因此, 有部分研究提出, 使用可再生能源的过剩电力, 以降低 DAC 的运行成本, 同时可提升布置的灵活度^[42]。

表 1 和表 2 统计了目前全球主要的 DAC 公司及其项目, 并根据装置类型进行分类。无论使用何种吸附剂, 大多使用 TVSA 作为再生方式, 其原因可能是 TVSA 循环能够提升解吸后的 CO₂ 体积分数, 有利于后续资源化利用。根据 TRL 的评价标准, 大部分的企业的技术成熟度为 TRL6, 基本完成了原型的验证, 仅有 Climeworks 一家公司达到 TRL8-9, 基本完成商业化运营。由此可知, DAC 的商业化发展还未成熟, 仍有很大的提升空间。

表 1 全球主要 DAC 公司
Tab.1 Main DAC companies in the world

企业	国家	吸附剂	再生方式	再生温度/℃	捕集 1 t CO ₂ 成本/美元	技术成熟度 (TRL)	文献	
Climeworks	瑞士	胺基吸附剂	TVSA/S-TVSA	80~120	600	8-9	[5,43-45]	
集中式装置	Global Thermostat	美国	胺基吸附剂	TVSA	60~120	300	7-8	[5,44]
	Carbon Capture	美国	沸石	TVSA			5-6	[44]
	Heirloom	美国	Ca 基吸附剂	TSA	900	目标 50	6-7	[44]
	Skytree	荷兰	胺基吸附剂	TSA	60~80	—	5-6	[5,44]
	Carbon Collect	爱尔兰	离子交换树脂	MTVSA	40~100	目标 100	6-7	[44-45]
集成式装置	Soletair Power	芬兰	胺基吸附剂	TVSA	<100		6-7	[33]
	Carbon Reform	美国	Ca 基吸附剂				5-6	[46]
	NeoCarbon	德国		低温热源			5-6	[37]

表 2 代表性 DAC 项目
Tab.2 Representative DAC projects

项目	年份	捕集 CO ₂ 规模/(t·a ⁻¹)	CO ₂ 处理方式	特点	企业
Capricorn	2017	900	温室气体肥	世界第 1 座商业运行装置	Climeworks
Mammoth	2024	36 000	封存	世界最大规模	Climeworks
K-series	2022	1 000	封存	北美第 1 座千吨级装置	Global Thermostat
MechanicalTree	2022	30	封存	被动式装置	Carbon Collect
HVAC unit	2021—2024	7~20	资源化利用	HVAC 耦合 DAC	Soletair Power
NeoCore	2024	62.5	资源化利用	冷却塔耦合 DAC	NeoCarbon

3 DAC 产业化发展方向

不论何种形式的 DAC 系统, 其技术路线发展的最终目的大多为降低运行及基础设施的成本, 可见产业化的难点大多集中在成本。因此, 本章节将介绍目前 DAC 研究或产业化中, 以降低成本为目的, 未来可能的发展方向及难点。

3.1 降低吸附过程的成本

由于空气中的 CO₂ 体积分数极低, 需要 1 400 m³ 的空气流经反应器才能够捕集 1 kg 的 CO₂, 因此过

大的床层阻力, 会增加吸附过程的床层压降, 导致风机能耗过高。据统计, DAC 系统中 50%~60% 的总能耗用于吸附过程^[47], 通过降低风机压力, 能够减少吸附过程的运行能耗。因此, 部分研究、示范项目为了减少风机能耗, 使用结构化固定床、结构化吸附剂、移动床等方式降低风机压降的需求。

Chen 等人^[48]提出一种使用颗粒吸附剂的 W 型结构化固定床, 相比于传统填充床牺牲了 1/3 的填料体积, 但是床层压降下降 12.04%~14.68%, 风机能耗从 88.7 kJ/mol 降低至 15.1 kJ/mol。Climeworks

公司目前的装置也是采用结构化固定床的形式,提高吸附剂与空气接触的表面积,以降低气流压降^[49]。未来, Climeworks 将使用结构化吸附剂,取代目前的颗粒吸附剂,由于提升了动力学从而获得更高的捕集量,成本可能降低 50%^[43]。

Stampi-Bombelli 等人^[50]比较了胺官能化氧化铝颗粒及结构化吸附剂在填充床内的吸附性能,通过伪一阶(PFO)和双重动力学(DK)模型分别描述颗粒与结构化吸附剂填充床的突破曲线,发现结构化吸附剂填充床的传质速度更快,并且在 400 $\mu\text{L/L}$ CO_2 体积分数下,结构化吸附剂的能耗降低,吸附效率提高,具有应用潜力。上海交通大学的研究团队^[51]开发了使用结构化吸附剂旋转床的 DAC 装置,采用 TSA 再生吸附剂,实验结果表明产气体积分数达 7 000 $\mu\text{L/L}$,产量为 9.1 $\text{kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^3)$, CO_2 的捕集成本为 104~165 美元/t,捕集后的产气作为可气肥,促进农作物增产。

移动床的优点在于反应器长度短,有助于减少床层压降。Twente 大学的研究团队^[52]研发了一种径向流移动床反应器,装置使用 2 kg 的商业胺基吸附剂 Lewatit VP OC 1065,特点为低压降(低于 700 Pa)、吸附时间短(24~43 min),吸附过程的能耗仅为 0.7~1.5 GJ/t,吸附完成后吸附剂被送至外部的流化床反应器进行解吸。

除了上述方法,“被动式”DAC 也是近年来备受关注的发展方向。此种方案不需要使用额外的风扇收集空气,而是使用自然风进行吸附以减少能耗(如 Heirloom、Carbon Collect 等企业)。Heirloom 公司的分析表明,相比于其他装置吸附过程中 0.5~1.0 GJ/t 的能耗,Heirloom DAC 装置的能耗仅为 0.05 GJ/t^[11,53]。

3.2 集成式 DAC 装置

集成式 DAC 装置发展迅速,许多企业都推出了试点装置。这些装置大多与冷却系统、新风系统集成,利用原先设施的风机为 DAC 装置提供气流,又或是利用废热以减少 DAC 装置所需的额外能量输入。集成式装置能降低基础设施的投资成本以及运行成本,例如 Carbon Reform 的装置能满足 1 900 m^2 空间的新风需求,运行不到 1 年降低了 50%的暖通能耗,并产生了投资回报^[54]。Zhao 等人^[55]分析 DAC 装置结合建筑通风系统,结果表明,室内空气的高含量 CO_2 有助于提高第二定律效率,当 CO_2 体积分数为 3 000、2 000、1 000 $\mu\text{L/L}$ 时,第二定律的最

佳效率分别为 44.57%、37.55%和 31.60%。

Abdullatif 等人^[56]研究了 HVAC-DAC 集成式装置的应用,由于空气需要额外流经 DAC 吸附剂,会增加流动阻力,因此需要对吸附剂的结构、反应器的形式进行优化,此外,高湿室内空气会增加吸附剂的吸水量,使得解吸能耗上升,需要开发低吸水量的吸附剂。An 等人^[20]搭建 HVAC 集成 DAC 的装置,试验运行结果显示, DAC 系统并不影响原系统的性能,但是吸附剂会产生额外的压降,使得原先 HVAC 系统的能耗、成本增加。综上,对于集中式或者集成式装置,吸附过程的压降都是不可避免的问题,因此,高性能的结构化吸附剂^[57],将是未来 DAC 领域的重点研究方向之一。

3.3 降低能源成本

由于目前 DAC 装置运行过程需要大量能耗,因此部分研究指出,可以通过使用低碳、低成本的能源,以节省运行成本和运行过程中产生的碳排放。吸附法的部署位置相较于吸收法更加灵活,因此有助于布置在具备废热、清洁能源丰富的地区^[6]。Climeworks 利用冰岛的地热产生蒸气与电力,建造了大规模的 DAC 装置,就是降低能源成本的典型案例。

Shi 等人^[58]比较了 4 种低品位热源驱动的 TVSA 循环,结果表明在 373 K 的再生温度下,使用冷凝水余热的热泵,具有最低的捕集成本,平均 CO_2 的捕集成本为 176.7 美元/t。Ge 等人提出 I-DAC 系统,将 DAC 装置中低品位吸附热和外部余热用于热泵的蒸发侧;反之,将热泵冷凝侧的热量作为吸附剂再生时的解吸热。仿真结果表明,这种通过 DAC 系统直接提供热泵加热和冷却能量的方法, CO_2 的捕集运行能耗为 2.77 GJ/t,比起传统的 DAC 降低 69.5%的能量需求。

4 结语与展望

直接空气碳捕集 DAC 是近年来备受关注的负排放技术,并且 DAC 的产业化发展近年来也在全球逐渐开展。本文综述了目前产业化发展中一些代表性的 DAC 企业及其技术特点,并且提出未来产业化可能的几种发展方向,但未来的产业化推广还有以下问题需要注意。

1) 集中式装置 DAC 系统目前都往模块化的方向发展,即将多个捕集模块根据 CO_2 捕集的需求量进行组合。这种方式能够更加灵活地布置 DAC 系统,以便于在各地区开展碳捕集。此外,这些国外

大型的 DAC 系统,捕集后的 CO₂ 大多封存于地底,并未将 CO₂ 作为原料再加工成其他产物。对于中国等尚未大规模产业化发展 DAC 的国家,若能提倡将这些捕集后的 CO₂ 再度合成燃料或其他产物,将有助于提高 CO₂ 的商业价值,还能增加企业投资部署 DAC 装置的意愿,并降低石油、天然气等能源的开采,早日达成“碳中和”的目标。

2) 另外,对于集成式 DAC 装置,捕集后的 CO₂ 需要有完善的存储、输送等配套措施,才能将各地 DAC 系统产生的 CO₂ 集中进行封存、利用。若能解决 CO₂ 存储和输送问题,这种形式的 DAC 装置发展潜力极大。

【参考文献】

- [1] RITCHIE H, ROSADO P. Fossil fuels[EB/OL]. (2024-01-01) [2024-11-16]. <https://ourworldindata.org/fossil-fuels>.
- [2] MECKLING J, BIBER E. A policy roadmap for negative emissions using direct air capture[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 2051.
- [3] KARIMI M, SHIRZAD M, SILVA J A C, et al. Carbon dioxide separation and capture by adsorption: a review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2023, 21(4): 2041-2084.
- [4] IEA. Direct air capture[EB/OL]. (2024-04-25) [2024-11-16]. <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/direct-air-capture>.
- [5] BISOTTI F, HOFF K A, MATHISEN A, et al. Direct air capture (DAC) deployment: a review of the industrial deployment[J]. *Chemical Engineering Science*, 2024, 283: 119416.
- [6] 王鼎, 张杰, 杨伯伦, 等. 直接空气捕集 CO₂ 典型工艺分析及技术经济研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(增刊 1): 215-221.
WANG Ding, ZHANG Jie, YANG Bolun, et al. Research progress of typical process analysis and techno-economic research on direct air capture of carbon dioxide[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(Suppl.1): 215-221.
- [7] 张杰, 郭伟, 张博, 等. 空气中直接捕集 CO₂ 技术研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2021, 27(2): 57-68.
ZHANG Jie, GUO Wei, ZHANG Bo, et al. Refresh progress on direct capture of CO₂ from air[J]. *Clean Coal Technology*, 2021, 27(2): 57-68.
- [8] SANZ-PÉREZ E S, MURDOCK C R, DIDAS S A, et al. Direct capture of CO₂ from ambient air[J]. *Chemical Reviews*, 2016, 116(19): 11840-11876.
- [9] NIKULSHINA V, GEBALD C, STEINFELD A. CO₂ capture from atmospheric air via consecutive CaO-carbonation and CaCO₃-calcination cycles in a fluidized-bed solar reactor[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 146(2): 244-248.
- [10] NIKULSHINA V, AYESA N, GÁLVEZ M E, et al. Feasibility of Na-based thermochemical cycles for the capture of CO₂ from air: thermodynamic and thermo-gravimetric analyses[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 140(1/3): 62-70.
- [11] MCQUEEN N, GHOUSSOUB M, MILLS J, et al. A scalable direct air capture process based on accelerated weathering of calcium hydroxide[R]. *Heirloom*, 2022: 1-9.
- [12] SHI X, XIAO H, AZARABADI H, et al. Sorbents for the direct capture of CO₂ from ambient air[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 59(18): 6984-7006.
- [13] KUMAR A, MADDEN D G, LUSI M, et al. Direct air capture of CO₂ by physisorbent materials[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2015, 54(48): 14372-14377.
- [14] 王涛, 董昊, 侯成龙, 等. 直接空气捕集 CO₂ 吸附剂综述[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2022, 56(3): 462-475.
WANG Tao, DONG Hao, HOU Chenglong, et al. Review of CO₂ direct air capture adsorbents[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2022, 56(3): 462-475.
- [15] LACKNER K S. Capture of carbon dioxide from ambient air[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 2009, 176(1): 93-106.
- [16] 吴禹松. 用于空气二氧化碳捕集的多孔树脂吸附剂成型及性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020: 11-13.
WU Yusong. Research on formation and performance of porous resin adsorbent for direct air capture of CO₂[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020: 11-13.
- [17] 高云芳, 宋新山. 季铵基吸附剂 CO₂ 变湿捕集-释放机制及相关材料研究进展[J]. *低碳化学与化工*, 2024, 49(11): 104-112.
GAO Yunfang, SONG Xinshan. Research progress on CO₂ moisture swing capture-release mechanism of quaternary ammonium-based adsorbents and related materials[J]. *Low-carbon Chemistry and Chemical Engineering*, 2024, 49(11): 104-112.
- [18] CHOWDHURY S, KUMAR Y, SHRIVASTAVA S, et al. A review on the recent scientific and commercial progress on the direct air capture technology to manage atmospheric CO₂ concentrations and future perspectives [J]. *Energy Fuels*, 2023, 37(15): 10733-10757.
- [19] 亚洲首套! 霖和空气直捕 DAC 装置成功运行一周年! [EB/OL]. (2022-09-23)[2024-12-19]. <https://www.co2loop.com/newsinfo/4373075.html>.
- [20] AN K, BRECHTL J, KOWALSKI S, et al. A multifunctional rooftop unit for direct air capture[J]. *Environmental Science: Advances*, 2024, 3(6): 937-949.
- [21] CLIMEWORKS. Our journey to gigaton scale[EB/OL]. (2024-11-15)[2025-02-18]. <https://climeworks.com/purpose>.
- [22] CLIMEWORKS. Climeworks makes history with world's first commercial direct air capture plant[EB/OL]. (2017-05-31)[2024-11-15]. <https://climeworks.com/press-release/today-climeworks-is-unveiling-its-proudest-achievement>.
- [23] GUTKNECHT V, SNÆBJÖRNSDÓTTIR S Ó, SIGFÚSSON B, et al. Creating a carbon dioxide removal solution by combining rapid mineralization of CO₂ with direct air capture[J]. *Energy Procedia*, 2018, 146: 129-134.
- [24] CLIMEWORKS. Mammoth: our newest facility[EB/OL]. (2024-11-15)[2025-02-23]. <https://climeworks.com/plant-mammoth>.
- [25] SOLTTOFF B. Inside ExxonMobil's hookup with carbon removal venture Global Thermostat[EB/OL]. (2019-08-29)[2024-11-15]. <https://trellis.net/article/inside-exxonmobils-hookup-carbon-removal-venture-global-thermostat/>.

- [26] Global Thermostat unveils one of the world's largest units for removing carbon dioxide directly from the air[EB/OL]. (2023-04-04)[2024-11-15]. <https://www.globalthermostat.com/news-and-updates/global-thermostat-at-colorado-headquarters>.
- [27] Global Thermostat commissions first containerized T-Series system for multi-tonne direct air capture of carbon dioxide[EB/OL]. (2024-02-01)[2024-11-15]. <https://www.globalthermostat.com/news-and-updates/first-containerized-t-series-system>.
- [28] PR Newswire. Carbon Capture Inc. unveils first U. S. direct air capture system designed for mass production; modular units to be manufactured at new high-volume facility in Mesa, Arizona[EB/OL]. (2024-06-21)[2024-11-15]. <https://www.prnewswire.com/news-releases/carbon-capture-inc-unveils-first-us-direct-air-capture-system-designed-for-mass-production-modular-units-to-be-manufactured-at-new-high-volume-facility-in-mesa-arizona-302179051.html>.
- [29] Project Bison[EB/OL]. [2024-09-15]. <https://www.carboncapture.com/project-bison>.
- [30] Heirloom to build two direct air capture (DAC) facilities in Northwest Louisiana[EB/OL]. (2024-06-24)[2024-11-15]. <https://www.heirloomcarbon.com/news/two-direct-air-capture-facilities-in-northwest-louisiana>.
- [31] Heirloom. Projects[EB/OL]. [2024-11-15]. <https://www.heirloomcarbon.com/projects>.
- [32] Carbon Collect[EB/OL]. [2024-11-16]. <https://carboncollect.com/>.
- [33] POWER S. About soletair power[EB/OL]. (2024-09-25)[2024-11-15]. <https://www.soletairpower.fi/about-us/>.
- [34] POWER S. Products[EB/OL]. [2024-11-15]. <https://www.soletairpower.fi/products/>.
- [35] POWER S. Technical specifications of the outdoor direct air capture of CO₂ unit from soletair power made for ZBT[EB/OL]. (2021-08-14)[2024-11-15]. <https://www.soletairpower.fi/technical-specs-soletair-power-dac-unit-for-zbt/>.
- [36] POWER S. Technical specifications of HVAC integrated direct air capture unit: how building CO₂ capture works[EB/OL]. (2022-01-21)[2024-11-14]. <https://www.soletairpower.fi/technical-specs-of-hvac-unit-soletair-power/>.
- [37] The technology behind our direct air capture system[EB/OL]. (2024-11-15)[2025-02-23]. <https://www.neocarbon.tech/how-it-works>.
- [38] NEOCARBON. Establishing carbon-negative cement factories a roadmap for Germany[Z/OL]. [2025-02-18]. <https://www.zkg.de/en/artikel/establishing-carbon-negative-cement-factories-a-roadmap-for-germany-4115686.html>.
- [39] 翁小涵, 韩涛, 冯玮, 等. 负碳排放技术研究现状及进展[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(10): 159-174.
WENG Xiaohan, HAN Tao, FENG Wei, et al. Current status and progress of negative carbon emission technologies[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(10): 159-174.
- [40] 重大突破! 中国首台、亚洲最大工业级 DAC 装置中试成功[EB/OL]. (2024-07-16)[2024-12-19]. https://cpnn.com.cn/news/hy/202407/t20240716_1720118.html.
- [41] 张柠涛, 王茹洁, 汪黎东. 碳中和背景下直接空气捕集(DAC)的技术发展和经济性评估[J]. 南方能源建设, 2024, 11(5): 15-25.
ZHANG Ningtao, WANG Rujie, WANG Lidong. Technology development and economic assessment of direct air capture (DAC) in the context of carbon neutrality[J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(5): 15-25.
- [42] CALDERA U, BREYER C. Afforesting arid land with renewable electricity and desalination to mitigate climate change[J]. Nature Sustainability, 2023, 6(5): 526-538.
- [43] SCOTT A. Sucking carbon dioxide from air in Iceland[J]. Chemical & Engineering News, 2024, 102(17): 6.
- [44] BARAHIMI V, HO M, CROISSET E. From lab to fab: development and deployment of direct air capture of CO₂[J]. Energies, 2023, 16(17): 6385.
- [45] WANG E, NAVIK R, MIAO Y, et al. Reviewing direct air capture startups and emerging technologies[J]. Cell Reports Physical Science, 2024, 5(2): 101791.
- [46] Carbon Reform[EB/OL]. [2024-11-15]. <https://www.carbonreform.com/about>.
- [47] OZKAN M, BESARATI S, GORDON C, et al. Advancements in cost-effective direct air capture technology[J]. Chem, 2024, 10(11): 3261-3265.
- [48] CHEN S, SHI W K, YONG J Y, et al. Numerical study on a structured packed adsorption bed for indoor direct air capture[J]. Energy, 2023, 282: 128801.
- [49] 邢伟, 徐汝隆, 高贺同, 等. 专利视角下空气中直接捕集 CO₂ 技术发展分析[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(4): 86-97.
XING Wei, XU Rulong, GAO Hetong, et al. Analysis of the development of direct capture of carbon dioxide in the air from patent perspective[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(4): 86-97.
- [50] STAMPI-BOMBELLI V, STORIONE A, GROSSMANN Q, et al. On comparing packed beds and monoliths for CO₂ capture from air through experiments, theory, and modeling[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2024, 63(26): 11637-11653.
- [51] WU J, WANG K, ZHAO J, et al. A direct air capture rotary adsorber for CO₂ enrichment in greenhouses[J]. Device, 2024, 2(11): 100510.
- [52] YU Q, BRILMAN W. A radial flow contactor for ambient air CO₂ capture[J]. Applied Sciences, 2020, 10(3): 1080.
- [53] Technology[EB/OL]. [2024-11-15]. <https://www.heirloomcarbon.com/technology>.
- [54] Carbon Capsule[EB/OL]. [2024-11-15]. <https://www.carbonreform.com/carbon-capsule>.
- [55] ZHAO R, LIU L, ZHAO L, et al. Thermodynamic exploration of temperature vacuum swing adsorption for direct air capture of carbon dioxide in buildings[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 183: 418-426.
- [56] ABDULLATIF Y, SODIQ A, MIR N, et al. Emerging trends in direct air capture of CO₂: a review of technology options targeting net-zero emissions[J]. RSC Advances, 2023, 13(9): 5687-5722.
- [57] WU J, ZHU X, YANG F, et al. Shaping techniques of adsorbents and their applications in gas separation: a review[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2022, 10(43): 22853-22895.
- [58] SHI W K, ZHANG X J, LIU X, et al. Temperature-vacuum swing adsorption for direct air capture by using low-grade heat[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 414: 137731.

(责任编辑 杨嘉蕾)