

编号: 1671-6612 (2026) 03-395-08

暖通空调系统中碳捕获技术的研究进展

王东升 谢永亮

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 暖通空调 (HVAC) 系统作为建筑能耗与碳排放的核心来源, 其低碳转型是全球碳中和目标实现的关键环节。碳捕获技术与 HVAC 系统的深度集成, 不仅能降低建筑运营阶段碳排放, 更有望通过直接空气捕集 (DAC) 实现“负碳”运行, 成为建筑领域脱碳的创新路径。系统梳理了 HVAC-碳捕获集成技术的核心路线、材料创新、系统优化及工程应用进展, 结合近年来中英文核心文献与实际案例, 分析了当前技术面临的能耗、成本与规模化挑战, 并展望了未来发展方向, 为该领域的进一步研究与工程转化提供参考。

【关键词】 HVAC 系统; 碳捕获技术; 吸附材料; 系统集成; 建筑碳中和; 负碳运行

中图分类号 TU83/X511 文献标志码 A

Research Progress on Carbon Capture Technology in HVAC Systems

Wang Dongsheng Xie Yongliang

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 As the core source of building energy consumption and carbon emissions, the heating, ventilation and air conditioning (HVAC) system's low-carbon transformation is a key link in achieving the global carbon neutrality goal. The deep integration of carbon capture technology and HVAC systems can not only reduce carbon emissions during the building operation phase, but is also expected to achieve "carbon-negative" operation through direct air capture (DAC), becoming an innovative path to decarbonization in the building sector. This article systematically sorts out the core routes, material innovation, system optimization and engineering application progress of HVAC-carbon capture integrated technology. Combining Chinese and English core literature and practical cases in recent years, it analyzes the energy consumption, cost and scale challenges faced by the current technology, and looks forward to the future development direction, providing a reference for further research and engineering transformation in this field.

【Keywords】 HVAC system; Carbon capture technology; Adsorption materials; System integration; Building carbon neutrality; Carbon negative operation

0 引言

全球气候变化背景下, 碳中和已成为各国共识, 建筑领域作为碳排放三大核心板块之一 (占全球总量 30% 以上), 其脱碳进程直接影响碳中和目标的实现时效^[1]。HVAC 系统作为建筑能耗的“耗能大户”, 其能耗占建筑总能耗的 40%~60%, 部

分大型公共建筑甚至高达 70%, 且运行阶段碳排放占建筑全生命周期碳排放的 65% 以上, 成为建筑脱碳的重点攻坚对象。传统 HVAC 系统的设计核心聚焦温湿度调控与能效提升, 未将 CO₂ 排放控制纳入核心功能体系, 导致建筑运营阶段的碳排放“无差别释放”, 与碳中和目标形成显著矛盾。

作者简介: 王东升 (2001.02-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: w18581897893@163.com

通讯作者: 谢永亮 (1986.09-), 男, 博士, 副教授, E-mail: yongliangxie@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2026-01-16

碳捕获技术与 HVAC 系统的集成,通过“源头减排(优化系统能耗)+末端捕集(直接捕集CO₂)”的双重路径,为建筑低碳化提供了创新解决方案。根据捕集对象与场景差异,该技术路径主要分为两类:一是针对建筑内人员密集区域(如写字楼、体育馆、交通枢纽)的高浓度 CO₂ 通风气流捕集(浓度通常为 800–2000ppm),二是利用 HVAC 通风系统的空气流通特性,实现低浓度大气 CO₂ 的直接空气捕集(DAC,大气 CO₂ 浓度约 420 ppm)^[2]。近年来,随着材料科学、系统工程与智能化技术的跨学科融合,HVAC-碳捕获集成技术已从实验室基础研究逐步迈向规模化示范应用,Bryan 等^[3]研究明确了其在建筑脱碳中的技术可行性与战略价值,证实该技术可使建筑碳排放降低 30%–80%,部分场景实现负碳运行。

全球红利持续释放为技术产业化提供了良好环境,中国“绿色高效制冷行动方案”^[4]明确将 HVAC 低碳技术列为重点支持方向,对示范项目给

予最高 500 万元补贴;欧盟《建筑能效指令(2023/1791/EU)》^[5]要求 2030 年新建建筑实现近零碳,能源消耗较预期额外减少 11.7%的目标,这一目标将转化为更为严格的国家政策,2050 年既有建筑完成低碳改造,HVAC-碳捕获集成技术被列为核心支撑技术;美国《通胀削减法案》^[6]对建筑碳捕获项目提供每吨 CO₂ 85 美元的税收抵免。在此背景下,系统梳理 HVAC-碳捕获集成技术的研究进展、核心瓶颈与发展方向,对于整合跨学科研究资源、加速技术工程转化具有重要意义。

1 HVAC-碳捕获集成技术核心路线

HVAC-碳捕获集成技术的核心逻辑是“依托 HVAC 系统的空气处理流程,嵌入碳捕集模块,实现温湿度调控与 CO₂ 捕集的协同运行”,根据捕集原理与系统耦合方式,形成三大核心技术路线,各路线在能耗、成本、适用场景上各具优势,如表 1 所示。

表1 三大核心技术路线

Table 1 Three core technology routes

技术路线	核心原理	关键指标	适用场景
化学吸附技术	吸附剂与CO ₂ 发生特异性化学反应	捕集率80%–95%,能耗1.12–3GJ/吨–CO ₂ ,成本120–200美元/吨	工业建筑、高浓度CO ₂ 场景
物理吸附与材料创新	多孔材料孔隙结构的物理作用力捕集	吸附容量4–6mmol/g,再生能耗低30%,成本80–150美元/吨	商业建筑、潮湿环境
系统耦合与多技术集成	捕集与除湿/制冷/制热功 能耦合,能量梯级利用	COP4.2–5.0,捕集率92%–95%, 节能35%–50%	公共建筑、多气候区适配

1.1 化学吸附技术

化学吸附法因捕集效率高、适应性强,成为当前 HVAC 系统的主流应用技术。其核心是利用胺类吸附剂、金属有机框架(MOFs)等材料与 CO₂ 发生特异性化学反应,实现选择性捕集。传统胺法(如 MEA)虽成熟但存在能耗高、腐蚀性强等问题,近年来研究重点集中在吸附剂改性与工艺优化。Abdullatif 等^[7]通过优化化学吸附型 DAC 单元在 HVAC 系统中的安装位置与吸附条件,使捕集效率提升 15%,同时降低室内空气质量影响。也有团队创新提出解耦电化学碳捕集技术^[8],将单步电化学反应转化为电化学–化学耦合双步反应,规避氧气干扰,实现能耗降至 1.12GJ/吨–CO₂(仅为传统技术的 1/3–1/5),连续稳定运行超 200 小时,为 HVAC 系统提供了低能耗解决方案。此外,

MDEA 混合液作为改性胺类吸附剂,在楼宇通风系统中表现出优异性能^[9],捕集率维持 80%以上,解吸后 CO₂ 纯度达 99.5%,且具有良好的循环稳定性。

1.2 物理吸附与材料创新

物理吸附技术依赖材料孔隙结构的物理作用力实现 CO₂ 捕获,具有再生能耗低、无腐蚀等优势,关键在于高性能吸附材料的研发。Wu 等^[10]开发的碳纳米纤维(CNF)空气过滤器,可直接嵌入标准 HVAC 通风系统,潮湿环境下吸附容量达 4mmol/g,利用太阳能即可实现再生,在其情景外推假设下,若在大规模建筑通风系统中部署该类 CNF 过滤器,年减排潜力可达 5.96 亿吨 CO₂,该估算依赖建筑存量、运行小时数、再生能耗等假设,工程应用需在明确系统边界后再评估净减排效益。

如图 1 所示^[10], CNF 基 DAC 空气过滤器可嵌入 HVAC 通风流程, 通过减少新风量需求并利用太阳热/焦耳热实现吸附剂再生, 从而兼顾室内 CO_2 控制与能耗降低。美国能源部支持研发的微胶囊化碳吸附剂 (MECS)^[11], 通过聚合物外壳包裹液体吸附剂内核, 解决了传统吸附剂易流失的问题, 集成

到 HVAC 系统后可降低 30% 的捕集能耗。MOFs 与共价有机框架 (COFs) 等新型多孔材料也展现出巨大潜力, 其比表面积可达 $3000\text{m}^2/\text{g}$ 以上^[12], 通过结构修饰可实现 CO_2 吸附容量与选择性的协同提升, 王珺瑶等^[13]在综述中指出, 这类材料是未来 HVAC 系统吸附剂的核心发展方向。

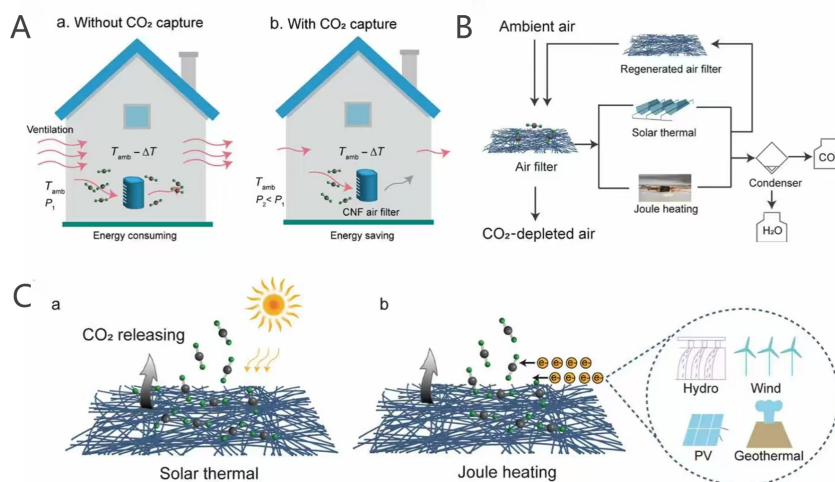


图1 CNF基DAC空气过滤器与HVAC系统集成及再生方式示意图。

Fig.1 Schematic diagram of CNF-based DAC air filter integration with HVAC systems and regeneration methods

1.3 系统耦合与多技术集成

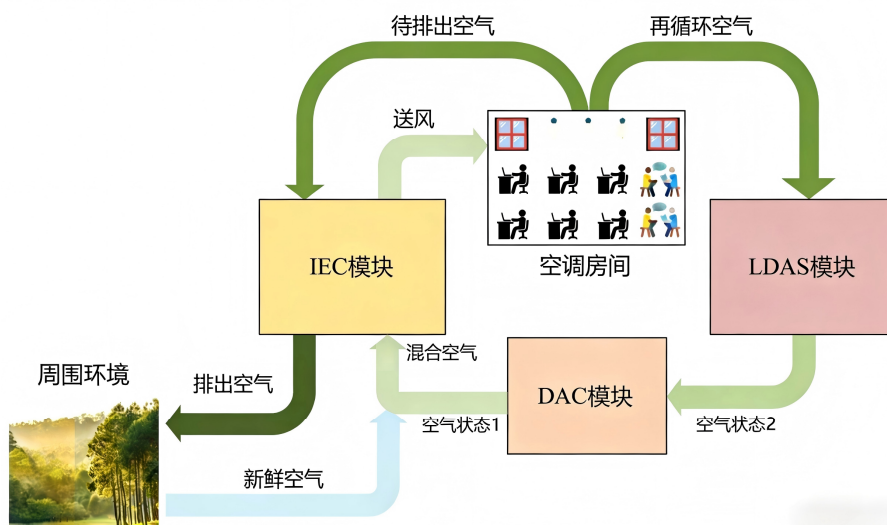


图2 一体化空调系统的系统描述示意图

Fig.2 Schematic diagram of the system description of the integrated air conditioning system

将碳捕获与 HVAC 系统的除湿、制冷/制热功能耦合, 实现能量梯级利用, 是提升系统综合能效的关键。Luo 等^[14]提出干燥剂除湿-间接蒸发冷却

- CO_2 捕获集成系统, 通过热力学优化使系统 COP 达 4.2, 同时实现 CO_2 捕集率 92%, 达成节能与减排双重目标。提出的干燥剂除湿-间接蒸发冷却

-CO₂ 捕获一体化空调系统的结构与工作流程如图 2 所示^[14]。PV/T-热泵驱动的溶液（液体干燥剂）除湿空调系统可将太阳能光伏/光热输出与热泵再生过程耦合，实现电能与热能的协同供给，从而为商业建筑的除湿-空调提供一体化供能路径。相关研究表明^[15]，PV/T 与液体干燥剂单元的耦合能够同时利用电功与低品位热源以支撑溶液再生与系统运行，并通过热泵提升再生热源品位以改善整体能效与可再生能源利用水平。此外，真空再生（真空解吸/真空汽提）与热泵的耦合被认为是降低溶剂再生温度与促进过程电气化的潜在方向。真空汽提研究已研究过在较低再生压力（包括约 30kPa 等区间）下对再生过程与能耗的影响^[16]，而膜式真空再生等工作进一步展示了“降压-低温解吸”的可行性。在此基础上，通过压缩/热集成与高温热泵为再生端供热，有望降低再生对高品位蒸汽的依赖并减少系统能耗，具体收益取决于工况与系统边界。

1.4 评价指标与系统边界

为确保不同技术路线在 HVAC 场景下具备可比性，应明确系统边界与关键评价指标。在捕集端，

重点关注捕集率、吸附/解吸工作容量、循环稳定性及抗湿性能等材料-过程指标；系统端，需综合评估新增捕集模块对风阻（压降）与风机功耗、新风量与室内空气品质（IAQ）、以及温湿度调控性能的影响。

在能耗与碳效益核算方面，应区分再生热源品质（温度/真空条件）与供能方式（余热、热泵、可再生电力等），并在统一口径下报告单位净能耗与净减排效益。在经济性方面，可采用平准化捕集成本（LCOC）或改造期全寿命成本进行比较，同时说明是否计入风机增功、维护与吸附剂更换等工程要素，以避免“捕得多但净效益不显著”的结论偏差。

2 系统设计与优化研究

2.1 集成方式与结构优化

HVAC-碳捕获系统的集成方式直接影响捕集效率与能耗。主流集成方案包括：屋顶机组模块化集成、通风管道嵌入式集成、空气处理单元（AHU）一体化设计。主流集成方案及性能对比如表 2 所示。

表2 主流集成方案及性能对比

Table 2 Mainstream integration solutions and performance comparison

集成方案	核心特点	捕集率	能耗增量	适用场景
屋顶机组模块化集成	独立模块设计，与原有系统无干涉	85%–90%	10%–15%	新建商业建筑、集中式 HVAC
通风管道嵌入式集成	模块嵌入通风管道，空间占用小	80%–85%	8%–12%	既有建筑改造、分布式 HVAC
空气处理单元（AHU）一体化设计	捕集模块与 AHU 集成，功能协同性强	90%–95%	5%–10%	新建工业建筑、高需求场景

Oak Ridge 国家实验室将含胺功能化聚合物纤维的 DAC 模块安装在屋顶机组冷凝器侧，在不影响 HVAC 原有功能的前提下，实现 CO₂ 捕集率 85%，平准化捕集成本（LCOC）降至 120 美元/吨^[2]。Harrouz 等^[17]通过数值模拟确定了碳捕获通风系统中换热器的最佳布置位置，使能量利用效率提升 20%，验证了结构优化对系统性能的显著影响。研究强调，集成设计需充分考虑 HVAC 系统的风阻特性与空间约束，采用轻量化、模块化设计是降低改造难度的关键。图 2 给出了干燥剂除湿-间接蒸发冷却-CO₂ 捕集一体化系统的结构与流程，可用于说明模块化集成与能量耦合路径。新增捕集模块带来的压降会抬升风机功耗，是集成方案能耗增量的重要来源，应与换热器布置联合优化。

2.2 控制策略与能源协同

智能控制策略是协调 HVAC 温湿度调控与碳捕获功能的核心。Xu 等^[18]建立 HVAC-DAC 集成系统仿真模型，对比三种控制策略后发现，DAC 与需求控制通风（DCV）结合的模式，可在维持室内 CO₂ 浓度≤1000ppm 的同时，降低系统能耗约 16%。商业 HVAC 系统的实际应用案例^[19]显示，通过动态调节风阀开度与吸附剂再生周期，可使系统在不同负荷条件下均保持最优捕集效率，某办公建筑示范项目实现年捕集 CO₂ 2.5 吨，能耗增量控制在 10%以内。此外，数字孪生与 BIM 建模技术的应用，可提前预判系统能效瓶颈，减少试错成本，为大规模推广提供技术支撑。

利用可再生能源或 HVAC 系统余热驱动碳捕

获过程,是降低系统碳足迹的关键。光伏直驱热泵系统可减少传统AC耦合方案中的多级功率变换损失,并可通过储能或电网补能提高系统连续运行能力。中深层地埋管热泵蓄能系统与光伏的协同,可使HVAC-碳捕获系统的清洁电力消纳率达90%以上,某大型公共建筑项目实现年减排CO₂ 1.49万吨,投资回收期短于6年^[20]。冰轮环境开发的工业余热回收技术,可将HVAC系统余热用于吸附剂再生,使捕集能耗降低40%,捕集成本显著下降,展现出良好的经济可行性^[21]。

3 工程应用与案例实践

3.1 建筑端已部署或已验证的集成案例

从现有公开案例看,HVAC-碳捕获技术在建筑端的工程应用主要集中于办公楼通风系统、屋顶

机组和补风机组等典型空气处理单元,其共同特点是依托既有送排风基础设施,实现“空气输送-CO₂分离-再生回收”的一体化运行。其中,丹麦 Aarhus 的 Danica Pension 办公楼项目^[22]具有较强代表性,其示意图如图3所示。该项目将 Building Integrated Carbon Capture(BICC)单元接入办公楼既有HVAC系统及楼宇自控系统,利用固体胺吸附剂从通风空气中选择性捕集CO₂,并通过温度-真空变压吸附(TVSA)实现再生,所得CO₂纯度可超过98%。公开资料显示,该项目设计捕集规模约为15-20吨CO₂/年,且系统可根据室内CO₂水平与占用情况动态调节通风量与运行状态,体现出建筑通风控制与碳捕集协同优化的工程思路。该案例的意义在于,它展示了办公楼由“低碳建筑”进一步走向“具备碳汇功能建筑”的可能路径。

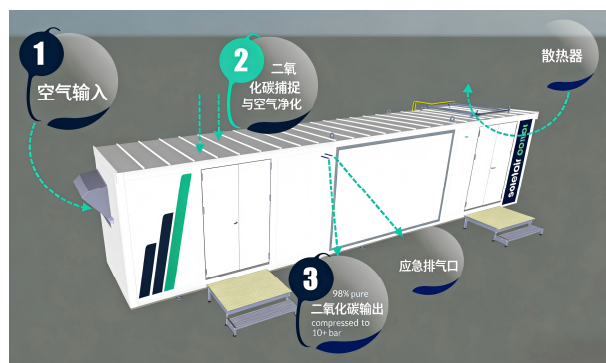


图3 丹麦Danica Pension项目楼宇(左)以及碳捕获示意图(右)

Fig.3 Danish Danica Pension project building (left) and carbon capture diagram (right)

除办公楼整体验证外,既有空气处理设备的模块化改造也是当前工程化的重要方向。Oak Ridge National Laboratory 提出的 RTU-DAC 方案^[2],其所提出的屋顶机组集成 DAC 示意图如图4所示,直接将填充三乙烯四胺功能化聚丙烯腈吸附材料的模块安装在商业建筑屋顶机组冷凝器侧,从而利用既有屋顶机组的大风量空气处理能力实现直接空气捕集。研究表明,该模块化设计对原有 HVAC 功能影响较小,但吸附性能随气候条件变化明显:在 Oak Ridge 的现场测试中,冷干月份 CO₂ 负载可达 3.86mmol/g,而暖湿月份降至约 1.62mmol/g,全年平均约为 2.11mmol/g。这说明屋顶机组集成 DAC 在工程上具有可行性,但其性能对室外温湿度高度敏感,后续设计中需充分考虑季节变化、面风速以及再生调度策略。

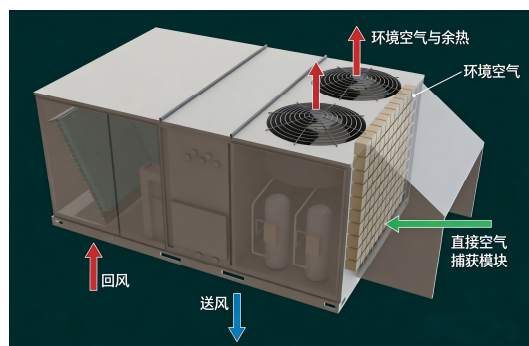


图4 Oak Ridge National Laboratory提出的屋顶机组集成DAC示意图

Fig.4 Schematic diagram of roof unit integrated DAC proposed by Oak Ridge National Laboratory

另一项更接近建筑排风捕集逻辑的案例,是 ORNL 针对 rooftop make-up air unit (MAU) 开展

的碳捕集示范^[23]。该研究将胺功能化聚合物纤维构成的紧凑型捕集模块布置在 MAU 排风端,在 CO₂ 排出建筑之前进行拦截与富集,其 MAU 单元示意图以及耦合捕获 CO₂ 示意图如图 5 所示。示范结果表明,吸附剂平均捕集量约为 1.1–1.4mmol/g;同时,研究进一步对材料成本、能耗、运输与再生进

行了技术经济分析,指出若要将平准化捕集成本降至 100 美元/吨 CO₂ 以下,仍需提高吸附剂工作容量并延长有效服役周期。相较于单纯的概念集成,该案例的优势在于给出了更明确的工程约束:建筑端碳捕集不仅取决于捕集率,更取决于吸附剂寿命、再生成本及维护方式。

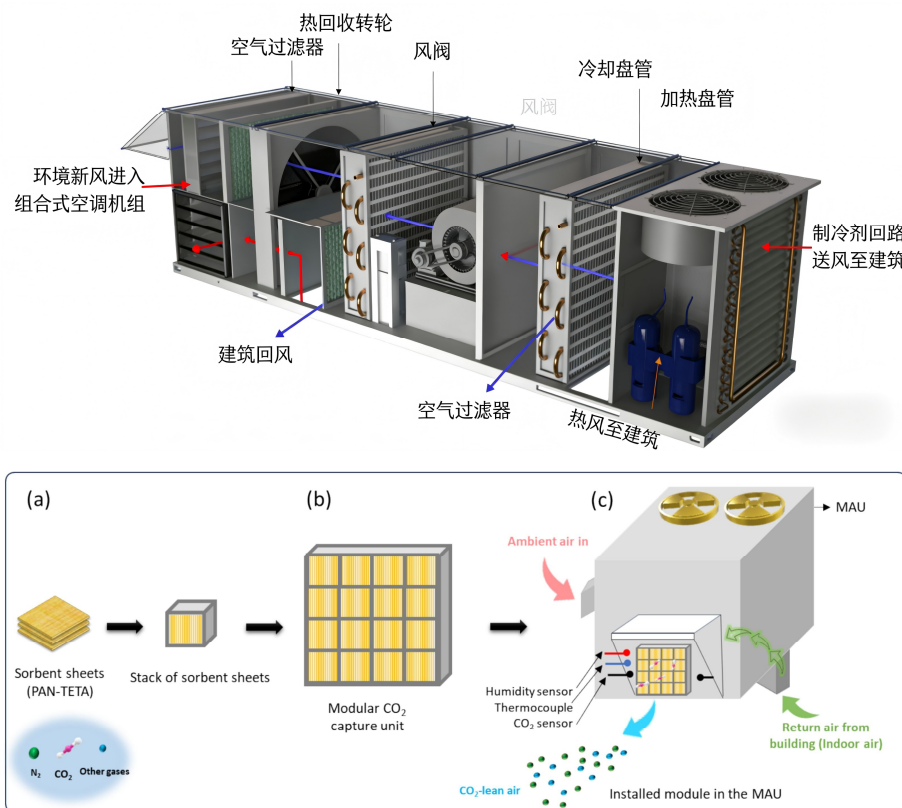


图5 MAU-CO₂捕集模块及PAN-TETA吸附片示意图^[23]

Fig.5 Schematic diagram of MAU-CO₂ capture module and PAN-TETA adsorbent sheet

3.2 典型建筑场景的扩展应用与规模化启示

在高人流密度的大空间建筑中,通风空气中的 CO₂ 负荷较高,因而更适合作为 HVAC-碳捕获技术的优先落地场景。瑞典 Linköping 的体育馆案例具有较强代表性^[24]。该研究以实际 gym space 的通风系统为对象,结合现场测量、运行工况分析和数值模拟,评估小型 DAC 接入通风系统后的碳捕集潜力。研究对象建筑面积约 1000m²、空间体积约 3000m³,结果表明单体场景下 CO₂ 捕集潜力约为 54–83kg/d;若将该方法推广至当地 20 个同类 gym spaces,总捕集潜力可达 588–750 吨 CO₂/年。研究还指出,与在运行时段频繁再生相比,利用非运行时段并结合低品位热进行再生,在经济性上更具优势,最低成本可降至 663SEK/吨 CO₂。该案例说明,

对于体育馆、展览馆和交通枢纽等大空间公共建筑, HVAC-碳捕获的关键不只是材料性能本身,更在于运行时段安排、再生热源获取方式以及建筑占用规律与通风负荷的匹配程度。

在工业建筑与园区场景, HVAC-碳捕获技术已向规模化方向发展。国家能源集团锦界电厂 15 万吨/年碳捕集项目^[25],将 HVAC 余热回收系统与碳捕集设备耦合,捕集效率超 90%–95%,纯度达 99.99%,成为国内标杆工程。国能浙江宁海发电有限公司建成国内首个万吨级煤电烟气低压吸附碳捕集装置,捕集能耗仅 331kWh/吨 CO₂,为工业建筑 HVAC 系统的低碳改造提供了参考。Liyanage 等^[26]评估了建筑供暖系统中碳捕获技术的社会经济与环境影响,为规模化应用提供了政策制定参

考。中冶南方都市环保的“工业气源高效低能耗CO₂捕集”技术,已应用于“一带一路”海外项目,展现出强大的国际竞争力。

综合现有案例可以看出,HVAC-碳捕获技术在工程应用上已形成两条较清晰路径:其一是面向办公楼、商业建筑等既有建筑的“设备级改造”,即在RTU、AHU或MAU等空气处理单元中嵌入模块化吸附/解吸单元,以较小改造量实现碳捕集功能;其二是面向高人流密度建筑的“场景级优化”,将占用特征、通风制度和再生热源协同考虑,以提升系统净减排效益。前者的核心在于低阻、模块化与维护便利性,后者的关键则在于再生排程、热源品质及控制策略。未来若要实现更大范围推广,仍需进一步解决高湿环境下吸附性能衰减、再生能耗偏高、长期运维成本不确定以及捕集收益与HVAC能耗增量之间的平衡问题

4 挑战与展望

尽管HVAC-碳捕获技术取得显著进展,但仍面临三大核心挑战:一是能耗与成本矛盾,传统胺法捕集成本约200-300美元/吨,虽经技术优化已降至120美元/吨左右,但距离商业化临界点(80美元/吨)仍有差距;二是材料性能瓶颈,现有吸附剂存在吸附容量有限、循环稳定性不足、规模化生产难度大等问题,尤其在HVAC系统的潮湿、变温环境下性能衰减明显;三是系统集成复杂性,HVAC系统与碳捕获模块的耦合易导致风阻增加、换热效率下降,现有控制策略难以实现多目标实时优化,且改造工程对既有建筑的适应性较差。此外,政策激励机制不完善、碳市场交易体系尚未充分覆盖建筑领域,也制约了技术的规模化推广。

未来HVAC-碳捕获应走向“材料-系统-控制-核证”协同。材料与工艺上,优先发展抗湿稳定、可成型、可维护的吸附/溶剂体系,并与低温/低压再生、热泵电气化及可再生能源供热匹配,形成面向建筑工况的长期循环验证闭环。系统集成上,以“低阻、模块化、易检修”为工程约束,建立压降-风机增功-捕集收益的系统模型,结合换热网络与部件布置开展多目标优化,提升既有建筑改造的可复制性。控制上,将捕集与DCV、负荷预测、再生排程联动,发展可解释/可迁移的控制框架。此外,电化学捕集、集成式直接空气捕集与原位转化

(IDACU)等新兴技术,有望成为下一代HVAC-碳捕获技术的核心方向,需加强基础研究与工程示范。

5 结束语

HVAC-碳捕获集成技术作为建筑领域脱碳的创新路径,已从理论研究逐步走向工程示范,在化学吸附、物理吸附、系统耦合等方面形成多元化技术路线。通过材料改性、系统优化与能源协同,该技术的能耗与成本已显著降低,捕集效率稳定在80%-95%,在公共建筑、工业建筑中展现出良好的应用前景。然而,能耗成本过高、材料性能不足、系统集成复杂等问题仍需通过跨学科合作攻克。未来,随着新型低能耗捕集技术的突破、智能化控制策略的完善以及政策激励机制的强化,HVAC-碳捕获技术将实现商业化规模化应用,为全球建筑碳中和目标的实现提供关键技术支持。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Geneva: IPCC, 2023: 35-115.
- [2] Keju An, Josh Thompson. A multifunctional rooftop unit for direct air capture [J]. Environmental Science: Advances, 2024,3(6):937-949.
- [3] Bryan Harvey, Salamah Fahad Ben. Building-integrated carbon capture: Carbon dioxide removal through buildings' mechanical systems[C]. 7th International Conference On Energy Research and Development, ICERD 2019.2019:320-327.
- [4] 国家发展改革委,工业和信息化部,财政部,等.绿色高效制冷行动方案[EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/hzs/sjdt/201906/t20190614_1130660_ext.html, 2019-06-13.
- [5] 李预江.欧盟建筑物节能管理法规解读及节能管理行为分析[J].上海节能,2023,(12):1832-1838.
- [6] 洪朝伟,杨超.美国《通胀削减法案》对全球清洁能源产业格局的影响[J].中国能源,2023,45,(11):82-93.
- [7] Yasser M Abdullatif, Ahmed Sodiq, Tareq Al-Ansari, et al. Optimizing chemisorption based direct air capture unit efficiency in HVAC systems: A study on the impact of

- DAC location and adsorption conditions as a response to the climate crisis and indoor air quality[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023,291.
- [8] Liu Tao, Wang Yunpeng, Wu Yifan, et al. Continuous decoupled redox electrochemical CO₂ capture[J]. *Nature Communications*, 2024,15(1):10920.
- [9] 张明,薛菲,余建飞,等.基于楼宇通风系统的低功耗碳捕集装置应用与实测[J]. *建筑科学*,2023,39(10):126-133.
- [10] Wu Ronghui, Delgado Hernan E. Xie Yi, et al. Distributed direct air capture by carbon nanofiber air filters[J]. *Science Advances*, 2025,11(42):eadv6846.
- [11] DOE Building Technologies Office. BTO Peer Review: Advanced Microencapsulated Carbon Sorbents (MECS) for Distributed Carbon Capture in Buildings[R]. Ivy Capture, 2024.
- [12] Rocchetti Andrea, Lippi Martina, Socci Luca, et al. Metal-Organic Framework Adsorbent Materials in HVAC Systems: General Survey and Theoretical Assessment[J]. *Energies*, 2022,15(23).
- [13] 王珺瑶,郭兆瑜,黄超,等.直接空气碳捕集与空调系统集成技术:研究综述及展望[J]. *制冷与空调*,2024,24,(11):60-68.
- [14] Jieli Luo, Yongting Shen, Hongxing Yang. Investigations on an integrated air-conditioning system using technologies of desiccant dehumidification, indirect evaporative cooling and CO₂ capture[J]. *Applied Energy*, 2024,369.
- [15] Shin Jang-Hoon, Park Joon-Young, Jo Min-Suk, et al. Impact of Heat Pump-Driven Liquid Desiccant Dehumidification on the Energy Performance of an Evaporative Cooling-Assisted Air Conditioning System[J]. *Energies*, 2018,11(2).
- [16] Alabdulkarem Abdullah. Efficiency enhancement for natural gas liquefaction with CO₂ capture and sequestration through cycles innovation and process optimization[D]. University of Maryland, College Park, 2014.
- [17] Harrouz J P, Ghali K, Ghaddar N. Optimal Placement of Heat Exchangers in a Carbon Capture-Based Ventilation System[J]. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 2023,21:363-367.
- [18] Youmin Xu, Xu Han, Xiangkun Elvis Cao. Modelica-Based Modeling and Simulation of an HVAC System Integrated with Direct Air Capture of CO₂[R]. *SimBuild 2024 (IBPSA Publications)*. May 21-23, 2024.
- [19] Working Group. Direct Air Capture in Commercial HVAC Case Study[EB/OL]. Project Frame, <https://projectframe.how/case-studies/direct-air-capture-commercial-hvac-2024>,2026-03-24.
- [20] 彭晨玮,邓杰文,朱超,等.面向清洁电力消纳的中深层地埋管热泵蓄能系统设计方法研究[J]. *暖通空调*, 2024,54(9):18-24.
- [21] 冰轮环境技术股份有限公司.用于碳捕集胺液再生的自给式热源热泵耦合系统及方法[P].中国专利:202511970228.8,2026-01-23.
- [22] Soletair Power. Installation case: buildings into carbon sinks: Soletair Power building integrated carbon capture at Danica Pension, Aarhus, Denmark[EB/OL]. <https://danica.dk/om-danica-pension/presse/nyheder/privat/danica-pension-etablerer-verdens-foerste-anlaeg-for-co2-fangst-i-en-kontorbygning>, 2026-03-24.
- [23] Poorandokht Ilani-Kashkouli, Jamieson Brechtel, Keju An, et al. Demonstration of the carbon capture with building make-up air unit[J]. *Energy and Buildings*, 2024, 325:114966.
- [24] Milić, Vlatko, Larsson, et al. Exploring small-scale direct air capture in a building ventilation system: a case study in Linköping, Sweden[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2024,12:1443974.
- [25] Qingru Cui, Rui Zhao, Tiankun Wang, et al. 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.
- [26] Liyanage, Don Rukmal, Hewage, et al. Carbon Capture Systems for Building-Level Heating Systems-A Socio-Economic and Environmental Evaluation[J]. *Sustainability*, 2021,13:(19):10681.