

二氧化碳的捕集、存储以及利用价值分析

李 珺 (山东莱克工程设计有限公司西安分公司, 陕西 西安 710000)

摘 要: 随着全球工业化进程的加速, 二氧化碳排放量急剧增加, 引发了温室效应、气候变化等一系列严重问题。为实现“双碳”目标, 二氧化碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术成为关键解决方案。本文对二氧化碳的捕集、存储及利用进行了系统分析, 详细分析不同捕集、存储技术及其特点, 探讨了二氧化碳在化工合成、工业应用、农业与生态等领域的资源化利用价值, 旨在挖掘该技术的科学意义与产业化潜力, 推动其从示范阶段迈向大规模商业化应用, 为实现碳中和目标提供有力支持。

关键词: 二氧化碳; 捕集技术; 存储技术; 资源化利用; CCUS 技术

中图分类号: TQ116.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 022-0064-03

Analysis of the value of carbon dioxide capture, storage, and utilization

Li Jun (Xi'an Branch of Shandong Laike Engineering Design Co., Ltd., Xi'an Shanxi 710000, China)

Abstract: With the acceleration of global industrialization, carbon dioxide emissions have sharply increased, causing a series of serious problems such as greenhouse effect and climate change. To achieve the "dual carbon" goal, carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technology has become a key solution. This article systematically analyzes the capture, storage, and utilization of carbon dioxide, and provides a detailed analysis of different capture and storage technologies and their characteristics. It explores the resource utilization value of carbon dioxide in chemical synthesis, industrial applications, agriculture, and ecology, aiming to explore the scientific significance and industrialization potential of this technology, promote its transition from demonstration stage to large-scale commercial application, and provide strong support for achieving carbon neutrality goals.

Keywords: carbon dioxide; Capture technology; Storage technology; Resource utilization; CCUS technology

自工业革命以来, 全球工业化进程飞速发展, 大量煤炭、石油和天然气等化石燃料的燃烧, 导致二氧化碳排放量持续攀升, 作为主要温室气体之一, 二氧化碳在大气中的浓度不断上升, 加剧了温室效应, 进而引发了全球气温升高、冰川融化、海平面上升、极端气候事件频发等一系列气候变化问题。为应对气候变化、实现全球可持续发展, 许多国家和国际组织提出了“双碳”目标, 二氧化碳捕集、利用与封存技术的应用, 有利于实现相对“零排放”目标。

1 二氧化碳捕集技术

1.1 燃烧后捕集技术

1.1.1 化学吸收法

化学吸收法是燃烧后捕集技术中应用广泛的方法, 适用于处理化石燃料燃烧后的烟气, 该方法以胺基溶液 (如 MEA、MDEA) 为吸收剂吸收 CO_2 , 其原理是利用胺基溶液与 CO_2 的化学反应, 使 CO_2 被吸收到溶液中, 捕集效率可达 85%~95%。然而, 该方法存在明显弊端。一方面, 溶剂再生能耗高, 吸收 CO_2 后需对吸收剂进行再生以恢复其吸收能力, 此过程消耗大量能量; 另一方面, 胺基溶液对设备有一定腐蚀性, 增加了设备维护成本和更换频率, 影响设备使用寿命。从化学原理看, MEA (乙醇胺) 与 CO_2 的反应是典型的酸碱中和反应。MEA 中的氨基呈碱性,

能与酸性的 CO_2 反应生成氨基甲酸盐, 反应式为: $2\text{RNH}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{RNHCOO}^- + \text{RNH}_3^+$ 。在实际应用中, 为提高吸收效率和降低能耗, 研究人员不断探索新型胺基吸收剂和改进吸收工艺, 如开发具有更高吸收容量和更低再生能耗的胺基化合物, 或采用混合胺吸收剂等。

1.1.2 物理吸附法

物理吸附法采用活性炭、沸石等多孔材料吸附 CO_2 , 这些材料比表面积大、孔隙结构丰富, 能提供大量吸附位点。该方法适用于低浓度 CO_2 捕集, 在低浓度下物理吸附选择性较高。但吸附容量受温湿度影响显著, 温度升高会使吸附容量下降, 因为吸附是放热过程, 升温不利于吸附平衡向吸附方向移动; 湿度增加也会影响吸附效果, 水分子会占据部分吸附位点, 降低 CO_2 吸附量。活性炭具有丰富的微孔和介孔结构, 对 CO_2 吸附性能良好; 沸石是有规则孔道结构的硅铝酸盐材料, 可调控孔道大小和形状以实现对不同分子的选择性吸附, 为提高物理吸附法性能, 研究人员采取多种措施, 如对吸附剂进行改性处理, 增加表面活性位点和吸附选择性, 优化吸附工艺条件, 控制温度、湿度和气体流速等, 吸附过程的主要能耗包括加热能耗和热量损失。降低吸附剂的温升、提高温湿比能有效降低能耗, 但同时也会导致吸附容量下降。为克服

物理吸附法的缺点, 研究人员采取了多种技术措施进行改性处理, 例如, 采用非活性炭和活性炭混合材料进行吸附分离、使用金属有机框架材料 (MOFs) 替代活性炭进行吸附分离等。另外, 发展了多种新型吸附剂, 如采用无机分子筛改性、有机-无机杂化材料和介孔材料等。

1.1.3 膜分离技术

膜分离技术利用气体渗透性差异分离 CO_2 , 不同气体在膜材料中的渗透速率不同, 选择合适的膜材料可实现 CO_2 与其他气体的分离。目前, 一些高性能膜材料价格昂贵, 限制了大规模应用, 且膜材料在长期使用中易受污染和损坏, 导致分离性能下降。膜分离技术基于气体在膜中的溶解-扩散机制。

气体分子先溶解在膜材料表面, 再在浓度梯度作用下扩散通过膜, 因不同气体溶解和扩散速率不同而实现分离。为降低膜材料成本和提高长期稳定性, 研究人员开展大量工作, 如开发新型聚合物膜材料, 提高分离性能和稳定性, 采用复合膜技术, 结合不同性能膜材料的优势; 研究膜的清洗和再生方法, 延长膜的使用寿命。

1.2 新型捕集技术

1.2.1 富氧燃烧

富氧燃烧通过提高燃烧氧气浓度 (>21%) 提升烟气 CO_2 浓度, 在富氧燃烧过程中, 燃料与高浓度氧气反应, 生成的烟气中 CO_2 浓度可提高至 90% 以上, 从而降低后续捕集能耗。但该方法也存在问题, 一是氧气供应成本高, 需专门制氧设备提供高浓度氧气, 增加了系统投资和运行成本; 二是燃烧控制难度大, 高浓度氧气使燃烧反应更剧烈, 需精确控制燃烧过程, 避免燃烧不稳定、过热等问题。富氧燃烧基于燃料在不同氧气浓度下的燃烧特性, 高氧气浓度使燃料燃烧更充分, CO_2 生成量更高。为降低氧气供应成本, 研究人员探索新型制氧技术, 如膜分离制氧、变压吸附制氧等, 同时研究先进燃烧控制策略, 确保富氧燃烧过程稳定高效。

1.2.2 化学链燃烧

化学链燃烧利用载氧体 (如 Fe_2O_3 、 NiO) 实现燃料与空气的间接反应, 载氧体在氧化反应器中与空气接触被氧化成高价态, 然后在燃料反应器中与燃料反应, 将氧气传递给燃料并自身被还原成低价态, 可直接产出高纯度 CO_2 , 捕集效率达 99%。然而, 载氧体循环稳定性是关键挑战, 循环使用中载氧体可能发生烧结、失活等现象, 导致性能下降。化学链燃烧反应分两个阶段。

氧化阶段, 载氧体 (以 Fe_2O_3 为例) 与空气反应:

$4\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4$; 燃料反应阶段, 载氧体与燃料 (以 CH_4 为例) 反应: $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CH}_4 \rightarrow 3\text{Fe} + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ 。为提高载氧体循环稳定性, 研究人员采取多种措施, 如对载氧体进行改性处理, 添加助剂提高抗烧结和抗失活能力, 优化反应工艺条件, 控制反应温度、压力和气体流速等。

1.2.3 直接空气捕集 (DAC)

直接空气捕集 (DAC) 技术针对大气中低浓度 CO_2 (400ppm) 进行捕集, 采用碱性溶液或固态胺吸附 CO_2 。由于大气中 CO_2 浓度极低, 捕集需处理大量空气, 该技术适用于分散式碳移除, 可在不同地点进行 CO_2 捕集, 灵活性较好。碱性溶液吸收 CO_2 基于酸碱中和反应, 如氢氧化钠溶液与 CO_2 反应: $2\text{NaOH} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$, 固态胺吸附剂通过胺基与 CO_2 的化学反应实现吸附。为降低 DAC 技术成本, 研究人员开发新型吸附剂和改进吸附工艺, 如研究高吸附容量、低再生能耗的固态胺材料, 采用太阳能等可再生能源驱动吸附和解吸过程。

2 二氧化碳存储技术路径

2.1 地质封存

2.1.1 油气藏封存

油气藏封存是将 CO_2 注入枯竭油田或气田的存储方式, 兼具提高采收率 (EOR) 与封存双重效益, 注入 CO_2 可降低原油粘度, 增加其流动性, 提高石油采收率, 同时 CO_2 可在油气藏中被长期封存, 减少向大气排放。例如, 陕西 15 万 t/aCCS 示范项目通过 EOR 实现石油增产 10%-20%, 考虑石油收益后封存成本约 -60 美元/吨, 这表明在某些情况下, 油气藏封存既能有效封存 CO_2 , 又能带来经济效益。

油气藏封存基于 CO_2 在油藏中的物理和化学作用, CO_2 可溶解在原油中, 降低其密度和粘度, 还能与油藏岩石反应, 改变岩石孔隙结构和润湿性, 进一步提高采收率, 但该方法存在风险, CO_2 可能从油藏泄漏, 影响环境, 因此需对油气藏进行长期监测, 确保 CO_2 安全封存。

2.1.2 咸水层封存

咸水层封存利用深层咸水层孔隙结构封存 CO_2 , 全球深层咸水层理论容量巨大, 可达 10,000-20,000Gt, 应用前景广阔。在咸水层封存过程中, CO_2 被注入深层咸水层, 依靠其孔隙结构和压力条件实现封存, 但需长期监测泄漏风险, CO_2 可能通过断层、裂缝等通道泄漏到地面, 危害环境和人类健康, 因此建立完善监测体系是关键。咸水层封存优点是分布广泛、容量大、对地质条件要求相对较低, 但也存在技术难题, 如 CO_2 在咸水层中的溶解和扩散规律、确保

CO₂ 长期稳定封存等问题。

2.2 矿化封存

矿化封存通过 CO₂ 与碱性矿物(如橄榄石、玄武岩)反应生成碳酸盐,实现永久固碳,实验表明,玄武岩矿化可在 2 年内固化 95% 的 CO₂,该方法安全性和稳定性高,因为碳酸盐稳定,不会向大气释放 CO₂。矿化封存反应过程复杂,以橄榄石(Mg₂SiO₄)为例,与 CO₂ 反应式为: $Mg_2SiO_4 + 2CO_2 \rightarrow 2MgCO_3 + SiO_2$,

然而,规模化应用矿化封存技术需解决反应速率与能耗问题。目前矿化反应速率慢,需消耗大量能量促进反应,为提高反应速率和降低能耗,研究人员探索各种方法,如采用催化剂、优化反应条件等。

3 二氧化碳资源化利用价值

3.1 化工合成

第一,高附加值化学品。CO₂ 与环氧化物共聚生成可降解塑料(如聚碳酸亚丙酯)是二氧化碳资源化利用的重要方向,可降解塑料生物降解性能良好,能在自然环境中逐渐分解,减少环境污染。全球可降解塑料产能已超 50 万 t/a,替代传统石油基塑料可减排 30%~50%。聚碳酸亚丙酯通过 CO₂ 与环氧丙烷在催化剂作用下共聚合成,反应式为: $nCO_2 + nC_3H_6O \rightarrow [CO_2 - C_3H_6O]_n$,这种可降解塑料在包装、农业、医疗等领域应用前景广阔。随着环保意识提高,对可降解塑料需求不断增加,为推动其发展,需降低生产成本,提高产品性能。

第二,燃料合成。通过电催化还原 CO₂ 制甲醇、乙烯等燃料是实现“负碳”生产的有效途径,该方法结合可再生能源电力,将 CO₂ 转化为有价值的燃料。电催化还原 CO₂ 原理是在电极表面施加电势,使 CO₂ 分子得电子发生还原反应,如电催化还原 CO₂ 制甲醇反应式为: $CO_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow CH_3OH + H_2O$ 。该方法不仅可减少 CO₂ 排放,还能将可再生能源转化为化学能储存,提高能源利用效率,但目前电催化还原 CO₂ 效率较低,需开发高效催化剂和优化反应工艺。

3.2 工业应用

第一,建筑材料。CO₂ 矿化制备碳酸钙骨料是二氧化碳在建筑材料领域的应用,将 CO₂ 与含钙物质反应生成碳酸钙用于制备建筑骨料,替代水泥原料可降低碳排放 15%~20%,碳酸钙骨料物理性能和化学稳定性良好,可用于制备混凝土、砖块等建筑材料。这种应用既能减少 CO₂ 排放,又能降低建筑材料生产成本,制备过程中需控制反应条件,确保碳酸钙质量和性能。

第二,食品级 CO₂。捕集纯度达 99.99% 的 CO₂ 可用于碳酸饮料、冷链物流等领域,根据相关统计分

析食品级 CO₂ 市场规模约 200 万 t/a,经济收益显著。在碳酸饮料中,CO₂ 赋予饮料气泡感和清凉口感;在冷链物流中,CO₂ 可作制冷剂,为满足食品级 CO₂ 质量要求,需采用先进捕集和提纯技术确保 CO₂ 纯度达 99.99% 以上。

3.3 在石油行业中的应用

CO₂ 捕获与封存是油气开采领域的一项重要内容,可有效地提高原油的开采效率,降低碳排放,产生巨大的经济效益和环保效益。随着油田的不断开发,随着油田的不断开发,地层压力逐渐降低,原油的流动能力也随之降低,常规的采油方法很难将残余油高效的提取出来。在这种情况下,将所捕获的 CO₂ 注入到油层中,可以使原油的粘度下降,地层压力升高,提高了原油的流动性,达到了增产的目的,提高原油的采收率,使油田的生产周期明显延长,同时,将注入到地层中的 CO₂ 进行深埋,达到减少温室气体排放的目的。但目前仍存在 CO₂ 捕获成本高、输送与注入基础设施匮乏、长期封存安全性有待验证等问题。在未来,随着碳捕获技术的发展以及碳排放交易的不断发展,CO₂ 在石化领域的应用将会更加广泛,这对于提升我国的能源利用率以及碳中和的实现具有重要意义。

4 结语

综上所述,CO₂ 作为重要的温室气体之一,具有巨大的减排潜力,通过储、存、用等多种途径减少 CO₂ 排放。目前,CO₂ 存储技术还需进一步优化,通过扩大储存空间和提高存储效率来提高 CO₂ 的资源化利用价值,同时应加强 CO₂ 存储技术基础研究与集成创新,研发出安全、高效、低成本的 CO₂ 储存技术和工艺,从而推进 CO₂ 资源化利用进程,促进碳中和目标实现。

参考文献:

- [1] 郑平洋,郝佳豪,常鸿,等.基于不同液化方式的液态二氧化碳储能系统研究进展[J].南方能源建设,2024,11(02):102-111.
- [2] 葛亮.基于多参量监测的二氧化碳两相流阻燃特性研究[J].中国安全生产科学技术,2023,19(07):63-68.
- [3] 张家俊,李晓琼,张振涛,等.压缩二氧化碳储能系统研究进展[J].储能科学与技术,2023,12(06):1928-1945.
- [4] 郭永峰.马来西亚推出利用枯竭油藏封存二氧化碳新方法[J].中国石油企业,2023,(Z1):77.
- [5] 郝佳豪,越云凯,张家俊,等.二氧化碳储能技术研究现状与发展前景[J].储能科学与技术,2022,11(10):3285-3296.