

# 低碳转型下的天然气脱碳技术研究进展

陈培星

(中海油能源发展装备技术有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524000)

**摘要** 在“双碳”目标引领与新型能源体系建设背景下, 天然气作为“转型支撑+安全保障”的双重功能能源, 其脱碳处理成为推动能源结构清洁化的关键环节。本文从天然气脱碳技术研究进展出发, 对现有脱碳技术进行了分类整理, 并分别总结了各类型脱碳技术的工作机理、流程优势以及脱碳效率等问题; 同时基于工程实例讨论了脱碳技术在实际工业化运行中遇到的经济性、适用性和可靠性等问题; 最后预测未来的技术发展趋势, 以期为天然气脱碳技术提升及低碳化应用推广提供参考。

**关键词** 低碳转型; 天然气脱碳技术; 分子筛膜; 费托合成

**中图分类号**: TE64

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.06.022

## 0 引言

相较于煤炭、石油等高碳化石能源, 天然气碳排放强度显著较低, 且几乎不产生颗粒物、SO<sub>2</sub>等污染物, 在工业替代、发电、民生取暖等领域的减碳作用突出。但是天然气的开采、加工以及利用过程仍然会有CO<sub>2</sub>排放, 并且天然气中所含有的CO<sub>2</sub>也会造成燃料热值的降低、对输配管路产生腐蚀性影响, 所以深度脱碳是天然气清洁化的必由之路。

## 1 传统天然气脱碳技术及应用现状

### 1.1 燃烧前碳捕集技术

燃烧前碳捕集技术是在天然气燃烧前对其进行处理, 分离出混合气中的CO<sub>2</sub>, 具有碳浓度高、捕集能耗低的优势, 适用于高压工况(10~80 bar), 气体中CO<sub>2</sub>浓度可达20%~50%。该技术核心工艺包括溶液吸收法、固体吸附法与膜分离法, 已具备商业运行能力。溶液吸收法根据吸收原理可分为物理吸收、化学吸收及混合吸收三类。物理吸收法主要是利用CO<sub>2</sub>在溶剂中的溶解度随着压力的变化而变化来对CO<sub>2</sub>进行吸收, 常用的吸收剂有甲醇、N-甲基吡咯烷酮等, 典型的流程为超低温Rectisol工艺, 该技术在中高压下捕集能耗低, 适合用于天然气化工转化过程<sup>[1]</sup>。化学吸收法是指以溶剂吸收剂与CO<sub>2</sub>发生化学作用生成不稳定的盐来进行吸收。经加热解吸再生, 具有捕集容量大、选择性高, 常压工况下效果好于物理溶剂的特点, 但有溶剂损耗及设备腐蚀的风险。固体吸附法依托物理或化

学吸附作用分离CO<sub>2</sub>, 物理吸附剂如活性炭、分子筛等通过压力调控实现再生, 化学吸附剂如负载胺、硅酸盐等可在200~600℃中高温环境工作, 无需冷却变换气, 降低整体捕集成本。

### 1.2 燃烧中碳捕集技术

燃烧中碳捕集技术通过富集O<sub>2</sub>减少N<sub>2</sub>稀释, 使燃烧产物中CO<sub>2</sub>浓度显著提升, 降低分离难度, 主要包括富氧燃烧与化学链燃烧技术, 适用于天然气发电、工业窑炉等场景。富氧燃烧技术以高浓度O<sub>2</sub>与CO<sub>2</sub>混合气体替代空气参与燃烧, 通过烟气循环持续富集CO<sub>2</sub>, 干烟气中CO<sub>2</sub>浓度理论上可达80%以上, 便于压缩分离, 具有成本低、易规模化、适配存量机组改造的优势。主要利用空分装置制取O<sub>2</sub>及烟气循环系统优化, 在煤粉炉改造中已有所应用, 匹配天然气燃烧系统的优化正在推进过程中。化学链燃烧是利用载氧体将燃料和空气进行间接反应, 燃烧生成物仅有CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>经冷凝可以直接回收。不需要其他分离设备。该技术系统由空气反应器、燃料反应器与载氧体组成, 金属氧化物载氧体在两反应器间循环氧化还原, 既传递O<sub>2</sub>又维持反应持续, 具有碳捕集效率高、能耗低的特点, 但载氧体的稳定性与循环寿命仍是制约产业化的关键<sup>[2]</sup>。

### 1.3 燃烧后碳捕集技术

燃烧后碳捕集技术针对常压、低浓度(2%~30%)烟道气进行处理, 是目前应用最广泛的碳捕集技术, 适用于天然气发电站、工业锅炉等各类排放源, 虽能

**作者简介**: 陈培星(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 前置分离器旋流分离。

耗与成本高于燃烧前捕集，但设备投资与维护成本较低，适配性强。燃烧后捕集的主流技术为化学吸收法，以碱性吸收剂（乙醇胺）为中心，CO<sub>2</sub> 在吸收塔中逆流接触反应被吸收，富液加热解吸再生，解吸出的 CO<sub>2</sub> 经提纯后储存或利用，该方法工艺成熟、捕集效率高，但其缺点在于能耗高、溶剂容易发生分解。固体吸附法基于变温吸附系统进行工作，在低温条件下吸附剂对 CO<sub>2</sub> 发生化学吸附，在高温条件下进行解吸再生，并不需要使用溶剂，可以避免对设备产生腐蚀作用，具有很好的节能效益，但是其吸附量以及再生能力还需要进一步提升。膜吸收法融合膜分离与化学吸收优势，通过微孔膜隔离气体与吸收液，依托吸收液选择性吸收实现分离，工艺简化、环境友好，是燃烧后捕集技术的重要发展方向。

## 2 新型天然气脱碳技术创新进展

### 2.1 分子筛膜高效分离技术

膜分离法作为一项低能耗、环境友好的新技术，是目前天然气脱碳技术的研究热点，特别是利用具有规整孔道结构和高分离选择性的沸石分子筛膜实现 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的高效分离，可以解决聚合物膜容易发生塑化导致甲烷流失率较高的难题。南京工业大学顾学红教授课题组制备了无缺陷中空纤维 DD3R 分子筛膜，应用于天然气脱碳。膜孔尺寸为 0.36 nm，在 CO<sub>2</sub> (0.33 nm) 和 CH<sub>4</sub> (0.38 nm) 动力学直径之间，有望基于分子筛效应进行分离。测试表明，每分离过 1 172 个 CO<sub>2</sub> 分子就有一个 CH<sub>4</sub> 分子穿过，分离因子显著高于已报道的其他类似膜。合成出 SSZ-13 分子筛膜及 MFI 分子筛膜，本工作通过工艺改进解决了高性能分子筛膜的规模化制备问题，为该材料在天然气脱碳、氢气分离等领域的产业化应用奠定了基础。与传统胺吸收法相比，分子筛膜分离技术无需加热再生，能耗显著降低，且无溶剂污染问题，适配天然气长输管道预处理、小型分布式气站脱碳等多元场景。

### 2.2 卤素调控费托合成脱碳技术

费托合成可以将天然气转化制得的合成气进一步制备成液体燃料或者烯烃，但是传统的费托合成过程会产生大量的 CO<sub>2</sub> (约 30%)，难以实现绿色环保发展。中国科学院山西煤化所李民举研究员课题组联合北京大学研究小组采用微量卤素化合物调节的方法，解决了困扰学术界百年的难题，实现了低能耗高效率并进。这项技术的关键是往反应气里添加百万分之一量级的卤素化合物（溴甲烷、碘甲烷等），卤素分子充当了

“指挥官”，它会在催化剂表面上进行吸附—解离—重组—脱附的过程，就像一个“电子闸门”来控制铁系催化剂的表面活性，从源头上消除活化水的通道，进而减少 CO<sub>2</sub> 的产生量。经试验验证可以降低 CO<sub>2</sub> 副产物低于 1%，提高高价值烯烃占比超过 80%，高于目前行业的平均值，达到了对 C 原子充分利用的目的<sup>[3]</sup>。

### 2.3 新能源耦合脱碳技术

依托新能源与天然气产业融合发展趋势，新能源耦合脱碳技术通过绿电、储能等与脱碳工艺结合，进一步降低脱碳过程的碳排放与能耗，形成“天然气清洁化+新能源消纳”的协同模式。在海上油气开发领域，全球首套 5 兆瓦级海上高温烟气余热发电装置完成测试，即将在文昌 9-7 油田应用。该装置回收天然气燃烧发电产生的高温烟气余热，年发电量可达 0.4 亿千瓦时，可节省天然气消耗约 3 亿立方米，减少 CO<sub>2</sub> 排放 80 万吨，同时提升主电站综合能效 7%，实现了脱碳与能效提升的双重目标。在陆地油田，辽河油田投产的世界首座电热熔盐储能注汽试验站，将绿电转化为热能储存在熔盐中，产生高温蒸汽用于稠油开发，每年可替代燃气蒸汽 1 600 万吨，减耗天然气 10.4 亿立方米，减排 CO<sub>2</sub> 225 万吨。

## 3 天然气脱碳技术应用瓶颈与制约因素

### 3.1 能耗与成本居高不下

能耗与成本是制约脱碳技术产业化的瓶颈。传统化学吸收法脱碳能耗占天然气利用总能耗的 15%~25%，溶剂再生、设备运维等成本较高，中小规模天然气利用场景无法承受；新型分子筛膜、卤素调控等方法虽然具有明显的能耗优势，但其核心技术、专用试剂的制备成本高，而且中试阶段的工艺优化消耗大量的财力，造成技术商业化成本缺乏竞争力。

### 3.2 规模化与场景适配性不足

不同的天然气应用场景工况差别较大，对于天然气脱碳技术也提出了多样化的适应需求。规模较大的天然气发电厂、化工园区等场景可以匹配传统的 CCUS 技术，但是其改造时间较长，占地空间巨大；而规模较小的分布式气站、“煤改气”的农村居民用气终端等场景，对脱碳装置的体积、操作难易程度以及费用有很高的要求，在实际中很难找到同时具有高效性和小型化的脱碳技术；近年来开发的一些新技术如分子筛膜分离技术虽然适用范围比较广，但是目前其工业化生产的技术还不成熟，不能够应用于大量天然气的脱碳处理过程中<sup>[4]</sup>。

### 3.3 技术稳定性与可靠性待提升

天然气成分复杂,部分气田伴生硫化氢、硫化物等杂质,会对脱碳材料、催化剂造成中毒、腐蚀,影响技术稳定性。传统化学吸收剂易受杂质影响降解,降低捕集效率;新型分子筛膜在含硫、含尘工况下,孔道易堵塞,使用寿命缩短;卤素调控技术中的催化剂长期运行后,表面状态可能发生变化,导致CO<sub>2</sub>抑制效果衰减。

### 3.4 政策与产业链支撑不完善

发展天然气脱碳产业需要健全的政策及产业链支持。当前,我国碳交易市场未全面覆盖到天然气脱碳,脱碳效益无法转化成经济效益;对新脱碳技术缺乏相应的补贴、税收减免等扶持性政策,科学研究研发与产业化联系不紧密。在产业链上,脱碳设备关键零部件严重依赖国外供应,国内产能及技术水平有待提升;碳封存及输送基础设施落后,难以形成“捕集—利用—封存”的全链条闭环循环,制约脱碳技术规模化发展。

## 4 低碳转型下天然气脱碳技术发展趋势

### 4.1 技术迭代聚焦高效低碳与低成本

新脱碳技术将不断改进关键特性,降低成本。对于膜法脱碳,将进一步精确控制分子筛膜孔径尺寸以提高耐杂能力和寿命,并通过批量生产过程改善材料价格;对于卤素控制方法,将进一步扩展使用范围并改进使用的卤素化合物类型及用量,提高催化剂寿命,实现商业化发展。现有成熟技术将进一步从工艺上减少能源消耗,如化学吸收技术将研发高效率、低损失的吸收液,并改进溶液回收技术;CCUS技术将结合新能源储能,在用电低谷时段使用可再生能源电力进行脱碳减污。

### 4.2 多技术融合与系统集成化发展

单一的脱碳技术很难同时满足高效、低成本、广适配的要求,多种技术的结合与系统化将是未来的发展方向。例如:将分子筛膜分离技术与化学吸收法相结合,采用膜分离进行初步分离浓缩CO<sub>2</sub>后,再用化学吸收法进行进一步的CO<sub>2</sub>脱除,达到分离高效低耗的目的;将新能源耦合技术与传统的CCUS结合,建立“绿电—脱碳—储能”一体式系统,实现能量梯级利用<sup>[5]</sup>。

### 4.3 场景化定制与智能化升级

根据不同应用场景下的工况需求,设计相应的脱碳方案是未来的趋势。对于一些大规模应用,如化工园区、发电厂等,设计更大规模、更高效率的脱碳装

置,并在设计上合理规划,优化运行条件;而对于一些分散式的小型应用,则设计出更小规模、可拆卸移动式的低造价脱碳装置,方便安装及使用维护。智能化会更加深入地脱碳装置结合,运用物联网、大数据、人工智能等手段,对脱碳过程能耗、分离效率、材料状况等进行实时监测,并据此动态调节运行工况,预测设备故障,优化设备运维策略,提高系统稳定性及运行效率,降低运维成本。

### 4.4 政策与产业链协同赋能产业化

良好的政策环境及完善的产业链条可助力脱碳技术产业化的推进。在政策方面,将进一步扩展碳交易市场,把天然气脱碳效益计入碳减排计算中来,推出对新型脱碳技术的补贴、税收减免政策,鼓励企业加大技术研发以及使用力度;完善相关标准及规范,明确脱碳技术性能指标、安全要求,推动规范化发展。在产业链上,加强关键材料、零部件自主研发能力与生产制造,打破国外垄断;加快碳储存、运输建设步伐,形成“捕集—利用—封存”全链条。

## 5 结束语

面对低碳发展新形势,天然气脱碳技术对推进天然气行业绿色低碳发展、“双碳”战略目标实现意义重大。现有的CCUS技术已具备产业化基础,但存在能耗大、成本高的缺点。分子筛膜分离、卤素调控费托合成、新能源耦合等新技术取得较大进展,在天然气深度脱碳领域有广阔应用空间。目前,天然气脱碳技术还存在成本、规模化、稳定性等方面的限制,需从技术迭代、多技术融合、场景化适配、政策赋能等方面推进技术产业化落地。

### 参考文献:

- [1] 焦丛哲. 低碳转型下的天然气脱碳技术研究进展[J]. 石化技术与应用, 2025, 43(06): 507-511.
- [2] 孙丹阳. “双碳”目标下天然气行业绿色低碳转型发展研究[J]. 节能与环保, 2024(07): 3-11.
- [3] 张云鹤, 郭政钦. 低碳转型: 天然气井口增压的绿色电力解决方案分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2024, 14(02): 173-175.
- [4] 吴本柱. 绿色低碳转型背景下的燃气电厂运营发展之道[J]. 中国电力企业管理, 2023(16): 82-83.
- [5] 洪启洋. 低碳转型时代北欧能源合作机制研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2022.