

变压吸附技术在工业化碳捕集中的应用及经济效益分析

景建龙（四川省达科特能源科技股份有限公司，四川 成都 610000）

摘要：在全球气候变暖的严峻挑战下，碳捕集、利用与封存（CCUS）技术作为缓解温室效应的关键手段，正迎来前所未有的发展机遇。变压吸附技术，作为燃烧后碳捕集的前沿技术，虽潜力巨大，但在效率与成本控制上仍待突破。本文深入剖析了变压吸附技术机制及其再生流程，并聚焦于硅胶、活性炭、分子筛等吸附材料的性能演进，展示了它们在吸附效率上的独特优势及研究进展。同时，梳理了低压变压吸附等创新工艺的应用现状与经济考量，强调其简易流程与显著经济优势，为工业级碳捕集铺设了可行路径。针对现有不足，本文提出了针对吸附材料结构优化、制备技术创新及性能提升的展望，旨在为 CCUS 技术的持续优化与工业化应用提供宝贵的见解与指导。

关键词：变压吸附技术；工业化碳捕集；应用；经济效益

0 引言

随着全球温室气体排放量的持续攀升，碳捕集技术已跃升为应对气候变化的关键战略之一。变压吸附技术，以其卓越的气体分离与捕集效能，在工业化碳捕集领域展现出广泛的应用前景。该技术精妙地利用吸附剂特性随压力变化的原理，实现对二氧化碳等温室气体的精准捕捉与分离，为后续的储存或资源化利用奠定了坚实基础。从经济效益视角审视，变压吸附技术在工业化碳捕集中独树一帜。其高效的气体分离能力，不仅大幅削减了能源消耗与直接碳排放，还通过优化流程设计，显著降低了运营与维护成本，展现出高度的经济可行性与环境友好性。尤为值得一提的是，通过该技术实现的碳捕集，企业可转化为宝贵的碳排放权收入，进一步促进了经济效益的最大化，形成了绿色发展与经济效益双赢的良性循环。

1 变压吸附原理

吸附，这一界面现象，深刻体现了物质在体相与界面间的交互作用，尤其在石油与化学工业中，它能够作为高效分离手段，精准剔除气体或溶液中的杂质与污染物。该过程核心在于气体组分依据其独特的吸附能力，自气相优雅迁移至固相吸附剂表层。整个流程精妙地始于原料气缓缓渗透吸附塔内密布的固体吸附剂床层，其间，吸附质仿佛被磁石吸引，紧紧依附于吸附剂表面；随后，待原料气完全通过，系统转而聚焦于吸附质的解脱与吸附剂的再生，循环往复，生生不息。吸附艺术，细分为物理与化学两大篇章。物理吸附，以分子间微弱的范德华力为笔，绘制出可逆的吸附画卷，其过程温和，吸附热低，速度快，且易于通过调整工况实现解吸，是工业生产中循环操作的

优选。相较之下，化学吸附则以化学反应为墨，书写下不可逆的强结合篇章，虽过程深刻，却增添了操作的复杂性。

变压吸附技术，作为气体分离领域的一朵璀璨新星，巧妙地运用压力变换的魔法，借助固体吸附剂的独特魅力，实现了对气体组分的精准分离与提纯。这一技术，根植于物理吸附的深厚土壤，通过高压吸附与低压解吸的巧妙循环，编织出 CO₂ 分子在固体表面吸附与释放的华丽篇章。当 CO₂ 分子轻盈地舞动至固体吸附剂的怀抱，它们便受到表面分子剩余引力的温柔牵引，部分分子欣然驻足，形成了一幕幕 CO₂ 浓度增高的壮丽景象，这便是吸附的奥秘所在。而环境压力的微妙变化，则如同开启了解吸之门的钥匙，让原本依偎在固体表面的 CO₂ 分子重获自由，回归气体相的广阔天地。在固定床内，固体吸附剂如同忠诚的卫士，静候着气体混合物的到来。随着气流缓缓穿过，基于传质阻力、流体速度及吸附平衡的微妙平衡，CO₂ 分子在吸附床底部率先达成吸附饱和的和谐状态，随后，这股分离提纯的接力棒便传递至传质区以上的床层，继续着它们的使命。尤为值得一提的是，吸附容量这一关键指标，如同衡量吸附效果的天平，随着压力的升降而翩翩起舞，精准地反映了吸附过程的动态变化。在高压的催化下，CO₂ 分子被固体吸附剂温柔地拥抱，而 H₂、N₂、CO 等其他气体组分则如过客般匆匆掠过，实现了 CO₂ 的高效分离与提纯，为工业生产的绿色发展贡献了一份重要推动力量。

吸附剂的再生，是确保其循环使用的关键步骤，通过降压、抽真空、冲洗及置换等多种工艺实现。降压法虽简便易行，却受限于较低的再生效率；抽真空

技术则能显著提升再生效果,但需权衡其较高的能耗成本。冲洗工艺,利用纯产品气作为媒介,有效降低 CO_2 分压,促进吸附剂再生,然而此举或影响 CO_2 的整体回收率。至于置换工艺,其精髓在于以更强吸附力的气体替换 CO_2 ,不仅显著提升 CO_2 纯度,更常与抽真空技术相辅相成,成为工业化碳捕集中不可或缺的优选方案。这些再生技术各具特色,根据具体应用场景灵活选择,旨在优化资源利用,提升碳捕集效率。

2 变压吸附材料

2.1 硅胶

变压吸附材料中的硅胶,作为一种重要的物理吸附剂,在气体分离与提纯领域,尤其是二氧化碳(CO_2)的捕集与回收中,扮演着至关重要的角色。硅胶以其独特的物理和化学性质,如高比表面积、丰富的微孔结构、良好的吸附选择性和再生性能,成为变压吸附技术中的佼佼者。硅胶在变压吸附过程中,主要通过物理吸附机制实现对 CO_2 的高效分离。当混合气体在高压下通过填充有硅胶的吸附塔时, CO_2 分子因受到硅胶表面剩余引力的作用,被选择性地吸附在硅胶的微孔内,而其他气体组分如氢气(H_2)、氮气(N_2)和一氧化碳(CO)等则不易被吸附,从而实现了 CO_2 的初步分离。随着吸附过程的进行,硅胶表面的 CO_2 浓度逐渐升高,直至达到吸附饱和状态。为了恢复硅胶的吸附能力,需要对其进行再生处理。再生工艺的选择对于提高硅胶的利用率和降低能耗至关重要。硅胶作为变压吸附材料,不仅广泛应用于二氧化碳的捕集与回收领域,还涉及合成氨工业、食品饮料加工工业等多个行业。其优良的吸附性能和再生性能使得硅胶在减少温室气体排放、促进资源循环利用等方面发挥了重要作用。随着技术的不断进步和环保意识的增强,硅胶在变压吸附技术中的应用前景将更加广阔。值得注意的是,硅胶的性能和吸附效果受到多种因素的影响,如粒度、孔径分布、表面物理化学性质等。

2.2 活性炭

活性炭,这一源自天然木材与果壳等可再生资源的瑰宝,经过精心的碳化与活化工艺雕琢,摇身一变成爲多孔含碳的颗粒或粉末材料,其独特的物理化学性质在气体分离领域大放异彩。其超大的比表面积如同微型迷宫,为 CO_2 等气体分子提供了丰富的吸附位点;而优异的结构稳定性与可调节的表面疏水性,则确保了其在复杂工业环境中的长效性能。特别是其耐水特性与低成本优势,使得活性炭成为烟气中 CO_2 分

离与大规模工业化应用的不二之选。作为非极性吸附剂的佼佼者,活性炭在挥发性有机化合物(VOCs)脱除领域同样展现出了非凡实力,有效净化了空气质量。通过创新的氢氧化钾(KOH)活化技术,科研人员巧妙地将氮元素融入活性炭骨架,不仅提升了产率至59.32%的新高度,还显著增强了其对 CO_2 的吸附能力,达到3.47mmol/g,这一突破为活性炭的制备与应用开辟了新路径。进一步的研究中,共浸渍法的应用更是将活性炭的吸附性能推向了新的巅峰。PEI/AC、 K_2CO_3 /AC及PEI- K_2CO_3 /AC等复合材料的诞生,尤其是PEI与 K_2CO_3 的巧妙结合,不仅将 CO_2 吸附容量提升至3.6mmol/g,还赋予了材料长期稳定性与水耐受性的双重提升,为燃烧后碳捕集技术带来了革命性的变化。此外,探索新型前驱体如木质素、淀粉及纤维素等多糖类材料,通过水热碳化与KOH活化的创新路径,成功制备出性能优异的新型活性炭材料,这不仅拓宽了活性炭的原料来源,也为活性炭的绿色生产与可持续发展提供了有力支撑。

2.3 分子筛

分子筛,是结晶态的硅酸盐或硅铝酸盐,由硅氧四面体或铝氧四面体通过氧桥键相连而形成的一种具有立方晶格的硅铝酸盐化合物。分子筛具有均匀的微孔结构,它的孔穴直径大小均匀,这些孔穴能把比其直径小的分子吸附到孔腔的内部,并对极性分子和不饱和分子具有优先吸附能力,因而能把极性程度不同,饱和程度不同,分子大小不同及沸点不同的分子分离开来,即具有“筛分”分子的作用,故称分子筛。由于分子筛具有吸附能力高,热稳定性强等其它吸附剂所没有的优点,使得分子筛获得广泛的应用。作者所在公司针对含甲烷烃类与二氧化碳混合气环境研制的DKT-511分子筛类专用吸附剂。与常规类活性炭及硅胶类吸附剂相比,其突出特点在于该吸附剂针对甲烷烃类与二氧化碳分离系数很高,可达30-50,是常规类脱碳吸附剂的10-20倍。优异的选择吸附性同时保证了较高的甲烷回收率和较高 CO_2 脱除率及高纯度 CO_2 解吸气,常规类脱碳吸附剂甲烷的收率最高到90%,而DKT-511吸附剂甲烷的收率可达98.5%以上。该吸附剂产品及相关工艺已在油田伴生气、煤层气、煤气等脱碳及碳捕集领域进行广泛工业应用,成功解决了传统变压吸附脱碳分离材料在上述领域所存在的烃类组分回收率低、 CO_2 气纯度低、工艺流程复杂和能耗高的生产问题。

3 变压吸附技术

3.1 多层变压吸附

多层变压吸附技术，作为碳捕集领域的一项创新解决方案，特别针对高湿烟气环境展现了卓越性能。自 Skarstorm 提出双塔四步循环以来，该技术历经优化，不仅提升了 CO₂ 的纯度和产率，更在应对高流量、高湿度及低分压烟道气体时展现出非凡的适应性。通过巧妙构建多层吸附体系，结合活性氧化铝类吸附剂 DKT-100、活性炭类吸附剂 DKT-30B 作为预吸附层与硅胶类吸附剂 DKT200 或分子筛类吸附剂 DKT-511 作为主吸附层的精妙布局，实现了对高湿烟气中水蒸气、杂质的有效拦截与 CO₂ 的高效捕获。DKT-100 与 DKT-30B 的双重屏障作用，显著降低了水蒸气杂质对 DKT-200 或 DKT-511 吸附性能的干扰，确保了 CO₂ 回收率高达 90%、单级变压吸附提纯后纯度达到 52.45% 的优异表现。展望未来，多塔配置与全流程吸附策略的应用，有望进一步推动该技术吸附效果的极限，引领碳捕集技术迈向新高度。

3.2 变温变压吸附技术

变温变压吸附技术，融合了温度与压力双重调控的精髓，在气体分离提纯领域展现出独特魅力。该技术通过精准控制吸附与脱附过程中的温压变化，有效利用了固体吸附材料对不同气体组分的选择性，广泛应用于气体干燥与 VOCs 回收。其操作简便、维护成本低，但传统模式下能耗较高且材料寿命受限。为此，创新性地耦合变压与变温吸附，实现能效与材料再生效率的双重飞跃。特别设计的带冷凝器分层吸附床系统，以活性氧化铝优化沸石 13X 配置，成功克服水蒸气干扰，显著提升了湿烟气中 CO₂ 的回收率与纯度，分别达到 90% 与 95% 的高水平。此技术不仅解决了强亲和力吸附材料低压解吸难题，还巧妙利用发电厂废热作为再生能源，为变温变压吸附技术的工业化进程注入了强劲动力。

3.3 低压变压吸附技术

低压变压吸附技术，作为一种创新的碳捕集策略，在降低能耗与成本方面展现出了巨大潜力。它巧妙利用低压环境，直接对烟气进行碳捕集，规避了传统高压变压吸附技术中高昂的增压能耗问题。该技术简化了预处理流程，省去了脱硫脱硝的复杂步骤，不仅减轻了设备投资负担，还显著降低了运行成本。烟气经风机初步加压，在水洗除尘后的烟气直接进入吸附过程，水蒸气、硫化物、氮化物等杂质在预处理过程被

拦截，再生阶段随碳捕集尾气一同处理，为变压吸附碳捕集提供有利的工作条件，烟气中 CO₂ 的回收率与纯度，通过 2 级变压吸附组合工艺分别达到 90% 与 95% 的高水平，为后续应用提供了灵活选择。同时低压工作工况显著降低了生产过程能耗，无论是直接封存还是工业利用，低压变压吸附技术都凭借其低能耗、低成本及工艺简化的优势，成为大规模工业化碳捕集领域的璀璨新星，前景可期。

4 经济效益分析

以 10 × 10⁴ t/a 燃煤电厂烟气碳捕集项目为例，选取胺化学吸收技术和常规变压吸附技术为对比对象，对低压变压吸附技术进行技术经济性分析，具体分析见表 1。

结果表明，低压变压吸附技术在一次性投资、运行能耗、运行成本等方面都具有显著优势，具有明显的市场竞争力。

表 1 10 × 10⁴ t/a 燃煤电厂烟气碳捕集项目的技术经济性分析表

| 技术 | 首次投资 / 万元 | 单位能耗 (GJ · t ⁻¹) | 单位成本 (元 · t ⁻¹) |
|--------|-----------|------------------------------|-----------------------------|
| 胺化学吸收 | 6000 | 2.8~3.8 | 300 |
| 常规变压吸附 | 7000 | 2.2~2.7 | 332 |
| 低压变压吸附 | 4500 | 0.9~1.2 | 183 |

5 结论

变压吸附技术在工业化碳捕集中展现出广阔的应用前景，但其发展之路亦非坦途，需直面多重挑战。首要任务是攻克增压能耗高企与捕集成本沉重的难题，以推动技术经济性的飞跃。同时，探索工业废热的创新利用途径，将其巧妙融入脱附工艺，不仅可大幅降低能耗，更促进了能源的循环再生，实现了绿色发展的双赢。此外，研发高性能、结构稳定、表面疏水且易于规模化生产的吸附剂，是解锁变压吸附技术大规模工业化应用的关键钥匙。唯有如此，方能全面激发变压吸附技术的潜力，引领碳捕集领域迈向更加高效、可持续的未来。

参考文献：

- [1] 玄振法, 刘磊, 徐希杉, 等. 变压吸附技术在焦炉煤气制氢上的应用 [J]. 山东冶金, 2024, 46(03): 62-64.
- [2] 马双营. 变压吸附分离技术在荒煤气提纯 CO 制乙二醇中的工业应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(11): 196-198.
- [3] 张璐瑶, 李广学, 张成龙. 低浓煤变压吸附提纯技术的模拟优化研究进展 [J]. 应用化工, 2024, 53(04): 941-944.