

煤化工生产中烯烃产物分离技术的优化

李金徽

大唐内蒙古多伦煤化工有限责任公司，内蒙古自治区锡林郭勒盟，027300；

摘要：本文围绕煤化工生产过程中烯烃产物分离技术展开研究，系统分析现有技术存在的问题，并提出多方面的优化策略，旨在提高烯烃分离效率与产品质量，降低过程能耗与环境污染，为煤化工产业的高质量发展提供技术支持。

关键词：煤化工；烯烃产物；分离技术；优化；节能降耗

DOI：10.64216/3080-1508.26.02.064

引言

随着我国煤化工产业的快速发展，烯烃作为重要的基础化工原料，其分离效率与纯度直接影响下游产品的质量与工艺经济性。当前，煤化工烯烃分离过程普遍存在能耗高、分离精度不足、运行成本高等问题，制约了产业整体竞争力。因此，开展烯烃产物分离技术的优化研究，对推动煤化工绿色、高效发展具有重要意义。

1 煤化工烯烃产物分离技术现状

1.1 现有分离技术概述

目前，煤化工中烯烃产物分离主要采用精馏、吸附和膜分离等技术。精馏分离是基础技术，通过多塔精馏实现低碳烯烃（乙烯、丙烯）与烷烃、C4+烃类的分离，某煤制烯烃装置采用3塔精馏流程，先脱除甲烷、乙烷轻组分，再分离丙烯与丙烷，最后处理C4+烃类，丙烯纯度可达99.6%；吸附分离多用于高纯度烯烃提纯，某项目采用分子筛吸附剂，选择性吸附丙烷，实现丙烯与丙烷深度分离，丙烯回收率提升至98%；膜分离作为辅助技术，某企业在精馏后引入膜分离装置，进一步脱除丙烯中微量丙烷，满足高端聚合级丙烯需求，现有技术已实现烯烃产物基本分离，但仍存在优化空间。

1.2 主要存在问题

现有烯烃产物分离技术存在“能耗高、分离效率低、选择性不足”的问题，制约工艺经济性。能耗高体现在精馏分离需大量加热与冷却，某煤化工装置烯烃分离单元能耗占总工艺能耗的35%，主要源于多塔精馏的反复汽化与冷凝；分离效率低表现为部分组分分离不彻底，某项目C4+烃类分离后，丁烯中仍含10%丁烷，需进一步处理才能满足下游需求；选择性不足导致目标产物损失，某吸附分离装置因吸附剂对丙烯、丙烷选择性差异小，丙烯在吸附过程中损失率达5%，这些问题不仅增加运行成本，还降低烯烃产物产量与纯度，影响整体工艺效益。

1.3 对工艺的影响

分离技术问题对煤制烯烃工艺的“经济性、产物质量、环保性能”产生不利影响。经济性方面，高能耗与低效率导致生产成本上升，某煤化工企业因分离单元能耗过高，丙烯单位成本增加15%，在市场竞争中利润空间被压缩；产物质量方面，分离不彻底导致烯烃纯度不达标，某项目丙烯中丙烷含量超标，无法用于高端聚丙烯生产，只能降级作为燃料气，产品价值大幅降低；环保性能方面，高能耗伴随高碳排放，某工厂烯烃分离单元年排放二氧化碳8万吨，不符合“双碳”目标要求。

2 分离技术优化的创新思维

2.1 基于绿色化学的思路

以绿色化学“低能耗、低污染、高原子利用率”理念优化分离技术，减少资源消耗与环境影响。在能耗优化上，开发低能耗分离工艺，某研究团队将热泵技术与精馏结合，利用塔顶蒸汽余热为塔底再沸器提供热量，某煤制烯烃企业应用该技术后，分离单元能耗降低25%；在污染控制上，采用环保型分离介质，某项目用可降解高分子膜替代传统有机膜，膜废弃后可自然降解，避免二次污染；在资源利用上，实现分离介质循环，某吸附分离装置使用的分子筛吸附剂，通过再生工艺可重复使用100次以上，减少吸附剂更换频率与固废产生，绿色化学思路让分离技术从“高消耗”转向“绿色高效”。

2.2 智能化控制理念

引入智能化控制理念，通过“实时监测、智能决策、精准调控”提升分离技术稳定性与效率。实时监测方面，在分离装置关键节点安装传感器，某煤化工装置在精馏塔塔板、吸附塔进出口安装温度、压力、组分浓度传感器，实时采集分离数据；智能决策方面，搭建AI控制平台；精准调控方面，实现设备自动调整，某精馏装置根据AI平台指令，自动优化回流比与塔底温度，将丙烯纯度稳定在99.8%，智能化控制让分离技术从“人工

经验调控”转向“数据精准调控”，减少人为操作误差。

2.3 多学科交叉融合思维

融合“化学工程、材料科学、信息技术、控制工程”多学科知识，突破分离技术瓶颈。化学工程与材料科学融合，开发新型分离材料，某团队结合化学工程的传质理论与材料科学的纳米制备技术，合成介孔分子筛吸附剂，对丙烯、丙烷选择性提升3倍；材料科学与信息技术融合，研发智能分离膜，某项目在膜材料中嵌入纳米传感器，实时反馈膜分离状态，通过信息技术传输数据至管控平台；控制工程与化学工程融合，优化分离流程控制逻辑，某企业基于控制工程的动态优化理论，重新设计精馏塔控制回路，缩短分离稳定时间，多学科交叉融合让分离技术突破单一学科局限，实现创新性优化。

3 关键影响因素分析

3.1 物料性质因素

物料性质“组分组成、相对挥发度、分子结构”直接影响分离技术选择与效果。组分组成方面，煤制烯烃产物中低碳烯烃与烷烃含量比例不同，分离难度差异大，某项目丙烯含量占60%、丙烷占15%时，精馏分离更易实现，若丙烷含量升至25%，则需增加吸附分离辅助；相对挥发度方面，组分间相对挥发度越小，分离越困难，丙烯与丙烷相对挥发度仅1.1，常规精馏需大量塔板，分离效率低；分子结构方面，烯烃与烷烃分子极性、空间结构差异影响分离介质选择性，丁烯分子含双键极性略高，与丁烷相比更易被极性吸附剂吸附，明确物料性质因素可为分离技术优化提供针对性方向。

3.2 设备性能因素

分离设备“结构设计、材质选择、运行稳定性”对分离效果与效率起关键作用。结构设计方面，精馏塔塔板类型与布置影响传质效率，某煤化工装置将传统浮阀塔板改为高效导向浮阀塔板，塔板传质效率提升20%，分离所需塔板数减少15%；材质选择方面，设备材质需适应物料特性，某吸附分离装置因吸附剂酸性较强，采用耐腐蚀不锈钢材质，避免设备腐蚀导致的杂质混入，保障烯烃纯度；运行稳定性方面，设备密封性能与振动控制影响分离，某膜分离装置因密封不良导致原料泄漏，烯烃回收率下降8%，设备性能因素决定分离技术能否稳定发挥作用，是技术优化的重要基础。

3.3 操作条件因素

操作条件“温度、压力、流量、回流比”直接调控分离过程，影响分离效果与能耗。温度方面，精馏塔温度控制需匹配组分沸点，某项目分离丙烯与丙烷时，将

塔顶温度控制在 -42°C ，塔底温度控制在 -30°C ，确保两组分有效分离，温度偏差超过 2°C 即导致分离不彻底；压力方面，压力影响组分相对挥发度，某吸附分离装置在 0.8MPa 压力下，吸附剂对丙烯选择性最佳，压力过高或过低均会降低选择性；流量与回流比方面，精馏塔进料流量需稳定，回流比需匹配分离需求，某工厂因进料流量波动，回流比未及时调整，导致丙烯纯度波动超1%，操作条件因素需精准控制，是分离技术优化的核心调控对象。

4 优化策略与方法

4.1 新型分离工艺开发

开发“精馏-吸附耦合工艺、精馏-膜耦合工艺、反应精馏工艺”等新型分离工艺，提升分离效率与经济性。精馏-吸附耦合工艺方面，某煤制烯烃项目先通过精馏脱除大部分丙烷，再用吸附分离深度脱除微量丙烷，该工艺在丙烯纯度要求高（如聚合级丙烯）的场景优势显著，相比单独精馏，不仅能降低30%能耗，丙烯纯度提升至99.9%，还减少了吸附剂用量，降低运行成本，目前已在3家大型煤制烯烃装置推广应用；精馏-膜耦合工艺方面，某企业在精馏后用膜分离进一步提纯，膜分离操作压力低于传统精馏（仅为传统工艺的60%），整体能耗降低20%，且设备投资减少15%，尤其适合中小型煤化工装置，可避免大规模精馏塔建设，缩短项目投产周期；反应精馏工艺方面，某研究团队将烯烃异构化反应与精馏结合，在分离丁烯异构体时，通过反应将低价值顺-2-丁烯转化为高价值1-丁烯，同时实现分离，该工艺无需单独建设异构化反应装置，减少设备占地面积40%，产物直接满足高端化工需求，新型分离工艺打破单一技术局限，实现“分离与转化”协同优化，适配不同规模与需求的煤化工项目。

4.2 设备改进与升级

通过“结构优化、材质升级、智能化改造”改进分离设备，提升设备性能与稳定性。结构优化方面，某精馏塔采用内件一体化设计，将塔板、降液管、分布器集成优化，通过流体力学模拟调整内件布局，减少塔内死体积，传质效率提升18%，同时降低塔内压降，减少动力消耗，改造后该精馏塔处理量提升25%，可应对煤化工装置产能提升后的分离需求；材质升级方面，某膜分离装置用陶瓷膜替代有机膜，陶瓷膜采用氧化铝-氧化锆复合材质，耐高温（可承受 400°C 以上温度）、抗污染能力强（可耐受含硫、含氮杂质），使用寿命从1年延长至3年，且分离性能更稳定，膜通量衰减率从每月5%降至每月1%，减少膜更换频次与运维成本；智能化

改造方面,某吸附分离装置安装智能阀门与在线监测系统,通过PLC控制系统实现吸附、再生过程自动切换,无需人工干预,操作精度提升,吸附剂利用率提高10%,同时系统可记录每次吸附-再生周期数据,为后续优化提供依据,设备改进与升级为分离技术优化提供硬件支撑,确保技术落地效果,适配煤制烯烃工艺长期稳定运行需求。

4.3 操作参数优化

基于“数据模拟、正交实验、实时调控”优化操作参数,实现分离过程精准控制。数据模拟方面,利用Aspen Plus等软件建立分离模型,某煤化工企业通过模拟优化精馏塔回流比与塔底温度,同时拓展模拟维度至进料组成波动、设备负荷变化等场景,找到不同工况下的最优参数组合,不仅能耗降低15%,还提升了工艺抗干扰能力,在进料丙烯含量波动 $\pm 5\%$ 时仍能稳定分离;正交实验方面,某团队通过正交实验研究温度、压力、流量对吸附分离的影响,同时加入吸附剂再生时间、再生温度等参数,构建多因素优化矩阵,确定最佳操作条件,丙烯回收率提升8%,且吸附剂再生效率提高12%,延长吸附剂使用寿命;实时调控方面,某企业在分离装置中引入先进控制系统,除根据实时组分浓度数据调整操作参数外,还关联上游煤制烯烃反应装置数据,提前预判进料变化,某精馏塔在进料组分波动前10分钟即启动参数预调整,在进料组分波动时,系统5分钟内完成参数调整,确保丙烯纯度稳定,操作参数优化让分离过程始终处于最优状态,提升效率与产物质量,适配煤化工工艺复杂多变的生产工况。

5 优化效果与展望

5.1 预期优化效果

分离技术优化可实现“能耗降低、效率提升、产物质量改善”的预期效果。能耗方面,通过新型工艺与参数优化,某煤化工装置烯烃分离单元能耗预计降低30%,年节约标准煤5万吨,减少二氧化碳排放12万吨;效率方面,分离效率提升使烯烃回收率提高10%,某项目年增产丙烯3万吨,C4烯烃回收率提升至95%,减少产物损失;产物质量方面,优化后丙烯纯度可达99.9%,满足高端聚合级需求,丁烯纯度提升至98%,可直接用于MTBE生产,预期优化效果将显著提升煤制烯烃工艺经济性与环保性,增强企业市场竞争力。

5.2 潜在应用前景

优化后的分离技术在“煤化工产业升级、炼化一体化、高端化工”领域具有广阔应用前景。煤化工产业升

级方面,优化技术可推动中小型煤制烯烃装置提升效益,某地区10家中小型煤化工企业计划引入优化分离技术,预计整体丙烯产量提升8%;炼化一体化方面,优化技术可与炼油、乙烯装置协同,某石化园区将煤制烯烃分离优化技术应用于炼化一体化装置,实现烯烃产物统一分离与调配,提升园区整体效益;高端化工方面,高纯度烯烃产物可支撑高端化工产品生产,某企业利用优化分离后的聚合级丙烯,生产高端医用聚丙烯,产品附加值提升50%,潜在应用前景让分离技术优化成为推动化工产业高质量发展的重要支撑。

5.3 未来研究方向

未来分离技术研究需向“新型分离材料开发、多技术深度耦合、全流程智能化”方向推进。新型分离材料方面,研发高选择性、低能耗的吸附剂与膜材料,如金属有机框架(MOFs)吸附剂,进一步提升丙烯、丙烷分离选择性;多技术深度耦合方面,探索“精馏-吸附-膜”三技术耦合工艺,实现更高效、更节能的分离;全流程智能化方面,融合数字孪生技术,构建分离单元数字模型,实现分离过程虚拟仿真与实时优化,未来研究方向将持续突破技术瓶颈,推动煤化工烯烃分离技术向“更绿色、更高效、更智能”方向发展,为化工产业可持续发展提供技术支撑。

6 结束语

通过对煤化工生产中烯烃产物分离技术的优化研究,提出了具有创新性的思维和方法。这些策略有望显著改善分离效果,推动煤化工工艺的发展。未来需进一步深入研究,以实现技术的广泛应用与持续改进。

参考文献

- [1]王文军. 3D打印核壳结构ZSM-5@B-ZSM-5整体式分子筛及其MTP催化性能[D]. 宁夏大学, 2024.
- [2]刘田菊. 高硅多级孔ZSM-5沸石的合成及其在MTP反应中的应用[D]. 安徽工程大学, 2024.
- [3]邢亚茹. 自支撑沸石合成及其催化MTP反应性能研究[D]. 大连理工大学, 2024.
- [4]潘飞飞. 气相色谱法测定MTP循环烃详细组成方法研究[J]. 石油化工应用, 2023, 42(11): 120-123.
- [5]伍利军, 李贞. MTP工艺中二甲醚催化剂的国产化应用[J]. 石油化工应用, 2023, 42(11): 117-119+123.

作者简介: 李金徽, 1994.03, 男, 汉族, 山西省大同市人, 本科, 毕业院校: 中北大学, 职称: 中级, 研究方向: 煤化工。