

空分技术在化工生产中的应用

石 林 乐 凯 徐世安
杭氧集团股份有限公司 浙江 杭州 310014

摘要：本文围绕空分技术在化工生产中的应用展开研究，阐述其核心原理、主要类型及核心设备与性能指标，分析该技术在基础化工、石油化工、精细化工等领域的具体应用，剖析当前应用中存在的能耗、技术、安全运维等问题，并提出针对性优化策略。空分技术作为化工生产的核心支撑，其合理应用可提升生产效率、保障安全稳定、降低能耗与成本，对推动化工产业绿色低碳、高质量发展具有重要现实意义。

关键词：空分技术；化工生产；应用

引言：空分技术是依托空气各组分特性差异实现分离提纯的关键技术，被称为“现代工业之肺”，广泛应用于化工生产各环节。随着化工产业向规模化、精细化、绿色化转型，对氧气、氮气等工业气体的纯度、供应量及稳定性要求不断提升，空分技术的重要性日益凸显。本文结合化工生产实际场景，系统探讨空分技术的应用现状、现存问题及优化路径，为化工企业优化空分系统、提升生产效益提供参考。

1 空分技术核心理论与主要类型

1.1 空分技术核心原理

(1) 基础原理：空分技术的核心逻辑是利用空气各组分的固有特性差异实现分离，主要依托三种核心机制——基于组分沸点差异（如氧气沸点-183℃、氮气沸点-196℃）进行冷凝分离；利用吸附剂对不同组分的吸附容量、吸附速率差异实现选择性吸附；依据组分在膜材料中渗透速率不同完成筛分分离，三种原理可单独使用或组合应用。(2) 核心流程：空分技术需遵循“预处理-分离-储存输送”的完整流程，原料空气先经预处理去除水分、二氧化碳、灰尘等杂质，避免后续设备堵塞或腐蚀；再通过对分离工艺完成氧、氮、氩等组分的提纯；最后将合格产品压缩至指定压力，储存于专用容器，通过管道或气瓶输送至使用终端，确保流程闭环、产品稳定供应。

1.2 化工生产中常用空分技术类型

(1) 低温精馏法：核心工艺是将原料空气深度冷却至液化状态，通过精馏塔内气液逆向接触，利用组分沸点差异反复冷凝、蒸发，实现组分分离；技术特点是分离效率高、产品纯度稳定，可制备纯度 $\geq 99.99\%$ 的氧气、氮气，适用于化工生产中高纯度气体需求场景，如合成氨、煤化工等大规模用气领域。(2) 变压吸附法（PSA/VPSA）：工艺原理是利用吸附剂在不同压力下对

组分的吸附能力差异，通过加压吸附、减压解吸的循环操作实现分离；操作特性是流程简单、启停灵活、能耗较低，无需深度制冷，适配中小规模用气场景，如小型化工企业、实验室等对气体纯度要求适中（90%-99.5%）的场景。(3) 膜分离法：核心优势是设备紧凑、投资少、运行成本低、无污染物排放，核心原理是利用膜的选择性渗透特性分离组分；适用范围较窄，主要用于低纯度气体制备（如氧气纯度25%-40%）及辅助分离场景，如化工尾气回收、原料空气预处理等^[1]。

1.3 空分技术核心设备与性能指标

(1) 核心设备：空压机负责将原料空气压缩至指定压力，为后续流程提供动力；精馏塔是低温精馏法的核心，实现组分的精准分离；分子筛纯化器用于去除原料空气中的杂质，保障设备安全运行；膨胀机通过气体膨胀产生冷量，维持低温分离所需的低温环境，各设备协同运作确保空分系统稳定运行。(2) 核心性能指标：分离效率直接决定原料利用率，效率越高能耗越低；产品纯度需匹配化工生产需求，不同场景对氧、氮纯度要求差异较大；能耗水平是空分技术经济性的关键，受工艺类型、设备性能影响；运行稳定性关乎化工生产连续性，需通过设备维护和工艺优化保障长期稳定运行。

2 空分技术在化工生产中的具体应用

2.1 在基础化工原料生产中的应用

(1) 合成氨生产：合成氨是基础化工产业的核心产品，广泛应用于化肥、化工原料等领域，其生产过程对氮气、氧气的需求量大且纯度要求严苛，空分技术是保障合成氨连续稳定生产的核心支撑。空分系统可精准制备纯度 $\geq 99.99\%$ 的氮气和 $\geq 99.5\%$ 的氧气，其中氮气作为合成氨的关键原料，与氢气按1:3的比例混合后进入合成塔，在高温高压、催化剂作用下完成氨的合成；氧气则用于原料煤的气化反应，为气化过程提供充足的氧化

环境,促进煤的充分转化,减少一氧化碳、粉尘等污染物排放。空分技术的优化应用,可精准控制氮氧比例、稳定产品纯度,有效降低原料损耗和反应能耗,显著提升合成氨的反应效率,保障装置长期稳定运行,降低企业生产成本^[2]。(2) 甲醇及烯烃制备:在甲醇和烯烃制备过程中,空分技术提供的氧气和氮气发挥着不可或缺的作用,直接影响产品质量和生产效率。氧气主要用于天然气、煤等原料的气化反应,为气化过程提供氧化动力,推动原料转化为合成气(一氧化碳和氢气),合成气经进一步反应生成甲醇,甲醇再通过裂解工艺制备烯烃,氧气的纯度直接决定气化反应的转化率、产物纯度及反应速率。氮气则作为惰性保护气广泛应用于整个生产流程,在原料输送、反应装置吹扫、产品储存等关键环节,通入氮气可有效隔绝空气,防止原料、中间产物及成品被氧化,避免产生杂质影响产品质量,同时防范氧化反应引发的燃烧、爆炸等安全风险,保障生产流程安全有序。

2.2 在石油化工生产中的应用

(1) 重油催化裂化、渣油加氢:重油催化裂化和渣油加氢是石油化工领域处理劣质油、提升资源利用率的核心工艺,空分技术提供的高纯度氧气是强化反应、提升效益的关键。在重油催化裂化过程中,氧气作为助燃剂通入反应装置,可有效提高反应温度和反应速率,促进重油大分子裂解为汽油、柴油等优质轻质油产品,显著提升劣质油的转化效率和轻质油收率,降低劣质油处理成本。在渣油加氢过程中,氧气参与加氢反应的辅助氧化过程,可优化反应条件、减少催化剂失活,降低反应能耗,同时提升加氢产品的纯度和稳定性,实现劣质渣油的高效利用,助力石油化工产业提质增效。(2) 装置安全运维:石油化工生产中,油气泄漏易与空气混合形成爆炸性混合物,存在极大安全隐患,空分技术制备的氮气是保障装置安全运维的核心介质。氮气具有惰性、不易燃易爆的特性,广泛用于石油化工装置的吹扫、置换和密封作业。在设备检修前,用氮气彻底吹扫管道和设备内部,置换残留的油气,防范检修过程中发生燃烧爆炸事故;在生产过程中,向设备密封部位通入氮气,形成密封气幕,既能阻止油气泄漏,又能隔绝空气,避免设备内部部件氧化腐蚀,全方位防范油气混合带来的安全风险,保障石油化工装置连续、安全、稳定运行^[3]。

2.3 在精细化工与特种化工中的应用

(1) 精细化工合成:精细化工产品(如医药中间体、染料、香精香料、食品添加剂等)的合成过程对反

应环境要求极高,易受氧气、水分等杂质影响,空分技术制备的高纯度氮气、氩气成为理想的惰性保护气。在精细化工合成反应中,向反应体系通入高纯度氮气或氩气,可彻底排除空气,营造稳定的惰性反应环境,有效防止反应产物氧化变质,避免产生副反应,确保产品的纯度和质量达标。同时,惰性保护气还能稳定反应温度、压力等关键参数,减少反应过程中的波动,提升合成反应的稳定性和重复性,满足精细化工产品精细化、高品质、高附加值的生产要求。(2) 特种气体制备:特种气体是高端化工、电子、航天、医药等领域的核心原材料,其中氦、氖、氙等稀有气体的主要来源是空气,依托空分技术可实现高效提取和提纯。空分系统在分离氧、氮的同时,通过深度精馏、吸附等精细化工工艺,从空气中分离提取氦、氖、氙等稀有气体,并进一步提纯至符合高端化工需求的纯度标准(部分可达99.999%以上)。这些稀有气体广泛应用于特种催化剂制备、高端化工合成、精密仪器校准、超导材料研发等场景,空分技术的成熟应用,打破了稀有气体依赖进口的局面,降低了高端化工产业的生产成本,满足了我国高端化工产业的发展需求。

2.4 在化工环保与节能中的辅助应用

(1) 污水处理:化工生产过程中会产生大量含有机物、重金属等污染物的工业废水,需经过严格处理达标后排放,空分技术制备的氧气在生化污水处理工艺中发挥着重要作用。将空分制备的氧气通过曝气设备均匀通入污水中,可显著提高水中溶解氧含量,促进水中微生物的代谢活动,微生物在有氧条件下可高效分解污水中的有机物,将其转化为无害的二氧化碳和水,同时降解重金属离子,显著提升污水处理效率和处理效果。此外,充足的氧气供应还可减少厌氧反应产生的硫化氢等恶臭气体,改善污水处理环境,降低环保治理成本^[4]。(2) 能耗优化:空分系统是化工生产中的高能耗设备,其能耗占化工企业总能耗的15%-30%,通过将空分系统与化工生产系统进行能量集成,可实现能源梯级利用,达到节能降耗的目的。空分系统运行过程中产生的冷量、余热,可回收利用于化工生产的原料冷却、产品冷凝、工艺加热等环节,减少其他加热、制冷设备的能耗;同时,化工生产过程中产生的副产气体(如二氧化碳、氢气),可作为空分系统的辅助原料或能源,优化空分系统的运行工况,降低空分系统的能耗。这种能量集成模式,既提升了空分系统的运行效率,又降低了化工生产的综合能耗,符合绿色化工、低碳发展的理念。

3 空分技术在化工生产应用中的问题与优化策略

3.1 应用过程中存在的主要问题

(1) 能耗问题: 空分设备属于高能耗装备, 其能耗占化工企业总能耗的15%-30%, 是化工生产中主要的能耗环节之一。当前多数化工企业的空分系统仍采用传统工艺, 设备运行效率偏低, 加之原料空气预处理、精馏分离等环节的能耗损耗较大, 导致单位产品能耗居高不下。同时, 部分企业未实现空分系统与化工生产的能量协同, 能源浪费现象突出, 节能潜力尚未充分挖掘, 增加了企业的生产成本。(2) 技术问题: 空分技术核心部件(如高端精馏塔、精密膨胀机、高性能吸附剂等)的适配性不足, 难以满足化工细分场景的个性化需求。在高端化工生产场景中, 对空分产品纯度、稳定性要求极高, 国内现有设备难以达到相关标准, 导致部分核心设备依赖进口, 不仅增加了设备采购和维护成本, 还存在供应链不稳定的风险, 空分技术国产化水平亟待提升。

(3) 安全与运维问题: 空分系统长期高负荷运行易产生各类安全隐患, 其中碳氢化合物在精馏塔内积聚可能引发爆炸风险, 原料空气中的水分、二氧化碳等杂质易在管道和设备内冻结, 造成堵塞、设备磨损甚至故障停机。此外, 空分设备结构复杂、自动化程度偏低, 运维流程繁琐, 对运维人员的专业技能要求较高, 一旦出现故障需停机检修, 会直接中断化工生产连续性, 给企业带来较大的经济损失。

3.2 针对性优化策略

(1) 能耗优化: 优先选用高效节能型精馏塔、新型高性能吸附剂及节能膨胀机, 减少设备运行过程中的能耗损耗; 优化空分工艺流程, 采用变负荷运行模式, 根据化工生产的实时用气需求动态调整空分系统负荷, 避免无效能耗。同时, 推动空分系统与化工生产主线进行能量集成, 回收利用空分系统产生的冷量、余热, 用于原料冷却、产品冷凝等环节, 实现能源梯级利用, 有效降低单位产品能耗, 提升企业经济效益。(2) 技术优化: 加大空分核心部件研发投入, 联合科研机构推进精

馏塔内件、精密膨胀机等核心设备的国产化攻关, 提升国产设备的性能、精度和稳定性, 打破进口设备依赖。针对化工不同细分场景的用气需求, 研发定制化空分技术, 如为精细化工领域研发高纯度空分系统, 为中小规模化工企业研发小型化、低成本空分设备, 进一步提升空分技术的场景适配能力^[5]。(3) 安全与运维优化: 完善空分系统安全监测体系, 安装碳氢含量在线监测、温度压力实时监测等设备, 实现安全隐患的实时预警、及时处置, 有效防范碳氢积聚、冻结堵塞等风险。推广自动化控制技术, 实现空分设备运行参数调节、故障排查、日常运维的自动化, 减少人工干预, 提升运维效率; 加强运维人员专业技能培训, 提升其故障判断和应急处理能力, 缩短停机检修时间, 降低停机损失, 保障空分系统及化工生产连续稳定运行。

结束语

综上, 空分技术在化工生产的原料制备、工艺强化、安全运维及环保节能等方面发挥着不可替代的作用, 是衔接化工生产各环节的核心纽带。尽管当前其应用仍面临能耗偏高、核心技术有待突破等问题, 但通过能耗优化、技术攻关及运维升级, 可实现空分技术与化工生产的深度融合。未来, 随着空分技术国产化推进与绿色化升级, 必将为化工产业高质量发展注入更强动力。

参考文献

- [1] 吴艳东. 现代煤化工空分装置噪声污染防治技术研究[J]. 中国煤炭, 2022, 48(08): 98-103.
- [2] 孙立峰, 张晓光, 黄宇. 空分空压技术在石化企业中的应用现状与展望[J]. 石油与天然气工程, 2020, 39(01): 71-74.
- [3] 郭卫东. 超低压全精馏技术升级尼龙化工空分装置[J]. 河南化工, 2021, 35(07): 44-45.
- [4] 于健炜. 大型煤化工空分技术与设备发展现状分析[J]. 化工管理, 2021, 21(08): 233-236.
- [5] 马志虎. 试论大型煤化工型空分设备及其自动控制技术[J]. 化工管理, 2021, 33(02): 108-110.