

石油化工装置节能优化路径研究

张书坡 易丽欣 刘志达

龙星科技股份有限公司 河北 沙河 054100

摘要: 石油化工装置作为高能耗产业,其节能优化对降低生产成本、提升竞争力及实现绿色发展至关重要。本研究聚焦工艺优化、设备升级、热能集成、数字化管理四大路径,通过创新反应流程、应用高效节能设备、强化余热回收、构建能源管理系统等措施,显著降低能源消耗,减少污染物排放,推动石油化工行业向低碳、高效方向转型,助力实现可持续发展目标。

关键词: 石油化工装置; 节能; 优化路径

引言: 在能源资源日益紧张、环保要求愈发严格的当下,石油化工行业作为能源消耗与碳排放的大户,节能优化迫在眉睫。当前,石油化工装置普遍存在能耗高、能源利用效率低等问题,不仅增加了企业生产成本,也给环境带来较大压力。探索行之有效的节能优化路径,既能提升企业经济效益与市场竞争力,又对推动行业绿色低碳转型、实现可持续发展具有至关重要的现实意义。

1 石油化工装置能耗现状与问题分析

1.1 典型装置能耗特征

(1) 炼油装置以常减压、催化裂化等为代表,具有高负荷、连续运行的特点,能耗主要集中于原料加热、产品分离等环节,其中常减压装置需消耗大量蒸汽用于原油蒸馏,催化裂化装置则因反应深度要求,反应器和再生器的能量损耗占比突出,单位产品能耗普遍在120-180kg标油/吨之间。(2) 化工装置以乙烯裂解、合成氨等为核心,乙烯裂解装置需在高温条件下断裂烃类分子,加热炉能耗占比超60%,且副产品回收环节的能量损失较大;合成氨装置受反应压力、温度等严苛工艺条件影响,压缩机、变换炉等设备的电力和蒸汽消耗极高,单位产品能耗可达1000-1500kg标油/吨,是石油化工行业的高能耗重点装置。

1.2 主要能耗环节分析

(1) 反应过程,多数石油化工反应需在特定温度、压力下,加热、加压过程中存在大量热量和压力损失,且部分反应存在副反应,导致能量利用效率降低,如催化裂化反应中,焦炭生成会带走大量热量,降低反应系统的能量转化率。(2) 分离过程,石油化工产品需通过蒸馏、萃取、过滤等多种分离工艺提纯,其中蒸馏工艺能耗占比最高,因混合物分离需消耗大量蒸汽加热和冷却水冷却,且分离塔的传热、传质效率不足会进一步加剧能量损耗^[1]。(3) 公用工程,蒸汽、电力、冷却水等公用工程是装置运行的能量基础,蒸汽输送过程中的管网

散热损失、电力传输中的线损,以及冷却水系统的循环泵能耗过高,均是公用工程环节的主要能耗问题,合计占装置总能耗的20%-30%。

1.3 现有节能措施局限性

(1) 技术瓶颈,现有节能技术存在诸多限制,如余热回收技术多集中于中高温余热利用,对低温余热(温度低于150°C)的回收效率不足30%,大量低温余热直接排放;变频调速、高效换热器等节能设备的应用范围有限,且部分核心设备依赖进口,国产化技术的稳定性和能效有待提升。(2) 管理缺陷,能源管理体系不完善,多数企业缺乏全流程的能源监测系统,无法实时精准掌握各环节能耗数据,导致能源浪费问题难以及时发现;能源调度不合理,公用工程与生产装置的负荷匹配度低,如蒸汽供应存在“大马拉小车”现象,电力峰谷时段的调度策略缺失,进一步加剧了能源消耗,此外,员工节能意识薄弱,操作不规范也会造成额外的能源损失。

2 石油化工装置节能优化技术路径

2.1 过程优化技术

(1) 工艺流程简化与集成,核心在于依托分子管理技术,精准匹配原料组分与产品需求,减少无效加工环节。例如,在炼油装置中,通过分子筛选技术分离原油中的优质组分,直接用于生产高附加值产品,规避传统全流程加工中的重复加热、分离损耗;同时采用过程集成技术,将不同装置的物流流、能量流高效耦合,如将催化裂化装置的副产品作为乙烯裂解装置的原料,实现资源梯级利用,可降低联合装置综合能耗8%-12%。(2) 反应条件优化,通过精准调控温度、压力、催化剂等关键参数,提升反应转化率与选择性,减少副反应带来的能量浪费。在催化裂化反应中,优化反应温度至500-530°C、调整剂油比至6-8,配合高效分子筛催化剂,可将原料转化率提升5%-8%,同时降低再生器的焦炭燃烧负荷;合

成氨装置中,采用低温低压合成催化剂,将反应压力从30MPa降至15MPa,温度从450°C降至380°C,可显著降低压缩机的电力消耗,单位产品能耗下降10%~15%^[2]。

2.2 热能集成与回收

(1) 夹点技术(Pinch Analysis)应用,作为过程系统节能的核心方法,通过分析装置的温焓图,确定冷热物流的换热匹配极限,优化换热网络设计。在乙烯裂解装置中,应用夹点技术重构换热网络,将裂解气冷却、原料预热等环节的冷热物流精准匹配,可减少加热炉燃料消耗15%~20%,同时降低冷却水用量;炼油常减压装置中,通过夹点技术优化蒸馏塔的换热流程,提升原油预热温度,减少加热炉负荷,可使装置单位能耗降低10~15kg标油/吨。(2) 低温余热回收,针对传统技术难以利用的低温余热(温度100~150°C),采用ORC发电、热泵技术等实现能量升级利用。例如,在炼油装置的常减压塔顶、催化裂化装置的稳定塔顶等低温余热排放点,配套ORC发电系统,将余热转化为电能,单套装置可实现发电功率500~2000kW,年节电400~1600万kWh;采用热泵技术回收低温余热用于装置伴热或原料预热,可替代30%~40%的蒸汽消耗,显著降低公用工程能耗^[3]。

2.3 设备效率提升

(1) 高效换热器、压缩机、泵的选型与改造,针对传统设备传热、传质效率低的问题,替换为高效节能设备。将传统管壳式换热器升级为板式、螺旋板式换热器,传热系数可提升30%~50%,减少换热面积与蒸汽消耗;选用高效离心式压缩机替代往复式压缩机,效率提升8%~12%,同时降低振动与噪音;采用高效节能泵,通过优化叶轮结构、减少内部泄漏,效率可提升5%~10%,单台泵年节电可达数千至上万kWh。对于老旧装置,通过设备国产化改造,如对催化裂化装置主风机进行叶轮升级、密封优化,可使风机效率提升5%~8%,降低电力消耗。(2) 变频调速与智能控制技术应用,根据装置负荷变化动态调节设备运行参数,避免“大马拉小车”现象。在泵、风机等变负荷设备上安装变频调速装置,可根据工艺流量需求实时调整转速,负荷降低30%时,能耗可降低50%以上;结合智能控制技术,实现设备运行状态的实时监测与闭环调控,如压缩机的防喘振智能控制、换热器的结垢预警与自动清洗控制,可进一步提升设备运行稳定性与能效,减少非计划停机带来的能量损失。

2.4 公用工程系统优化

(1) 蒸汽动力系统优化,核心在于实现蒸汽的梯级利用与背压发电,提升蒸汽能量利用率。构建多等级蒸汽管网(高压、中压、低压),根据不同装置、设备的

用能需求精准匹配蒸汽等级,高压蒸汽用于驱动透平机,中压蒸汽用于工艺加热,低压蒸汽用于伴热、保温,实现蒸汽能量的逐级利用;配套背压式发电机组,利用高压蒸汽做功发电后,将排汽作为中低压蒸汽供工艺使用,替代纯凝式发电,发电效率可提升15%~20%,同时减少蒸汽放空损失,一套百万吨级炼油装置的蒸汽动力系统优化后,年可节能1~2万吨标油^[4]。(2) 电气系统节能,通过无功补偿、绿色电力替代等技术降低电力消耗与损耗。在大型电机、压缩机等感性负载端安装无功补偿装置,可将功率因数从0.75~0.8提升至0.95以上,减少线路损耗10%~15%;推广使用光伏、风电等绿色电力替代传统火电,在装置厂区配套分布式光伏电站,满足部分照明、办公及辅助设备的用电需求,降低外购电力消耗,同时减少碳排放,部分企业绿色电力替代率已可达10%~15%。

2.5 数字化与智能化技术

(1) 能源管理系统(EMS)与数字孪生技术,构建覆盖全装置的能源监测网络,实时采集反应、分离、公用工程等各环节的能耗数据,通过EMS系统进行统计分析、能耗核算与异常预警,帮助企业精准定位能耗浪费点;基于数字孪生技术构建装置虚拟模型,映射真实生产过程,模拟不同工艺参数、负荷条件下的能耗变化,为节能优化方案的制定提供仿真支撑,避免实体试验的能耗与成本浪费,例如某乙烯装置通过数字孪生技术优化生产负荷,年节能8000余吨标油。(2) AI优化算法在能耗预测与调度中的应用,利用机器学习、深度学习算法分析历史能耗数据与生产参数的关联关系,实现能耗精准预测,预测误差可控制在5%以内;基于预测结果制定最优能源调度策略,如在电力峰谷时段优化公用工程设备的运行时序,峰时减少高耗能设备运行,谷时满负荷生产并储存能量,同时动态调整蒸汽、冷却水的供应负荷,实现能源资源的最优配置,进一步降低综合能耗,AI优化调度可使装置整体能耗再降低3%~5%。

3 石油化工装置节能优化路径实施策略

3.1 技术层面

(1) 短期聚焦设备改造与局部优化,以低投入、快见效的技术措施为核心,快速降低能耗短板。重点开展换热网络重构,基于夹点技术优化现有换热流程,替换低效换热器,提升冷热物流换热效率,单套装置可在3~6个月内实现能耗下降5%~8%;同步推进泵、风机等通用设备的变频改造,针对变负荷运行工况优化调速参数,减少“大马拉小车”现象,此类改造投资回收期通常不超过2年。此外,对蒸汽管网、冷却水系统进行泄漏检测与修复,降低公用工程损耗,进一步巩固短期节能成效。

(2) 中长期着力工艺革新与系统集成,突破局部优化瓶颈,实现全流程节能升级。推广氢网络优化技术,通过pinch分析整合装置内加氢装置的氢源与用氢需求,配套膜分离、变压吸附等提浓技术,提升氢气利用率,降低制氢装置能耗,可使氢耗量减少10%~15%;推进炼化一体化工艺革新,将炼油、化工装置深度耦合,实现物料与能量的跨装置协同,如炼油石脑油直接供乙烯裂解、化工副产品回炼增产,预计可降低综合能耗12%~18%。中长期技术实施需结合装置检修周期统筹规划,确保技术升级与生产稳定衔接。

3.2 管理层面

(1) 推进能源管理体系建设,严格遵循ISO50001标准,构建覆盖能源采购、转换、使用、回收全环节的管理机制。建立能源基准与标杆,明确各装置、各环节的能耗考核指标,将节能责任落实到班组与个人;搭建能源计量监测网络,实现重点用能设备、关键能耗环节的数据实时采集与分析,及时发现并整改能源浪费问题,通过体系认证的企业通常可实现能耗额外下降3%~5%。(2) 开展全生命周期能耗评估与决策支持,将能耗考量融入项目规划、设计、建设、运营、退役全阶段。在新项目规划阶段,采用生命周期评价(LCA)方法对比不同工艺方案的能耗与环境影响,优选节能技术路线;在运营阶段,定期开展能耗审计,评估节能措施的实施效果,结合生产负荷变化、原料性质调整等因素动态优化节能方案;在设备更新改造决策中,综合考量购置成本、运行能耗、维护费用等因素,选择全生命周期成本最优的节能设备^[5]。

3.3 政策与经济性分析

(1) 精准开展节能技术投资回报率(ROI)计算,建立全维度经济评估模型。明确评估范围涵盖设备购置、工程施工、运维管理等直接成本,以及节能带来的能源

费用节约、碳减排收益等间接收益,结合技术寿命周期测算ROI与投资回收期。例如,低温余热ORC发电项目通常投资回收期为3~5年,高效换热器改造项目回收期约2~3年;对于投资额度大、回收期长的系统集成项目,可采用增量投资收益率法评估其经济性,为投资决策提供依据。(2) 充分利用碳交易机制下的节能激励政策,降低实施成本。积极参与全国碳市场交易,将节能带来的碳减排量转化为经济收益,通过出售碳配额补充节能技术投资;主动申请地方政府的节能改造补贴、绿色信贷等政策支持,享受税收减免、电价优惠等激励措施;同时关注行业碳排放标准更新趋势,提前布局深度节能技术,规避碳成本上升带来的经营风险,实现节能与降碳协同增效。

结束语

石油化工装置节能优化是一项长期且系统的工作,对行业可持续发展意义重大。通过本文研究可知,从工艺革新、设备升级、热能回收,到数字化管理、智能化调度等多维度发力,可显著降低装置能耗、提升能源利用效率。未来,随着技术不断进步与管理持续完善,石油化工行业节能潜力将进一步释放,实现经济效益与环境效益双赢,为我国能源转型与绿色发展贡献坚实力量。

参考文献

- [1]林晓峰.石油化工装置节能技术研究进展[J].化工进展,2023,42(8):456-457.
- [2]王瑞祥.工艺优化对石油化工装置能耗的影响分析[J].化学工程与装备,2025,36(3):123-129.
- [3]刘志鹏,王世豪.石化企业装置能效提升的优化路径研究[J].石油化工设备技术,2023,44(6):29-34.
- [4]姚元胜,赵连庆,张杰.石油化工装置节能优化路径研究[J].石化技术,2023,30(8):239-241.
- [5]胡科杰.石油化工装置设备检修过程中的安全管理措施[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(14):62-64.