

化工企业空分装置管道系统能耗经济性分析与优化研究

郭旭斌 (中煤鄂尔多斯能源化工有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017317)

摘要: 空分装置是化工企业主要耗能设备, 管道系统能耗直接影响运营成本。通过对 75000Nm³/h 空分装置管道系统分析发现, 管道阻力损失占总能耗 12% ~ 18%, 保温不良造成的冷量损失占 8% ~ 15%。采用变频调速、优化管线布置和改进保温材料等措施后, 管道系统综合能耗可降低 10% ~ 13%。通过研究建立了管道系统能耗评价模型, 提出全生命周期成本导向的优化策略, 分析优化后的管道系统能耗经济性明显会有提升, 为化工企业节能降耗提供有效技术路径及方向。

关键词: 空分装置; 管道系统; 能耗分析; 经济性评价; 优化策略

中图分类号: TQ-9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2026) 005-0074-03

Economic analysis and optimization research on energy consumption of air separation unit pipeline system in chemical enterprises

Guo Xubin (middling coal Ordos Energy Chemical Co., Ltd., Ordos Inner Mongolia 017317, China)

Abstract: Air separation units are the main energy consuming equipment in chemical enterprises, and the energy consumption of pipeline systems directly affects operating costs. Through analysis of the pipeline system of the 75000Nm³/h air separation unit, it was found that pipeline resistance loss accounted for 12% to 18% of the total energy consumption, and poor insulation caused cooling loss accounting for 8% to 15%. After adopting measures such as variable frequency speed regulation, optimizing pipeline layout, and improving insulation materials, the comprehensive energy consumption of the pipeline system can be reduced by 10% to 13%. A pipeline system energy consumption evaluation model has been established through research, and a cost oriented optimization strategy for the entire life cycle has been proposed. The analysis shows that the optimized pipeline system will significantly improve its energy consumption economy, providing an effective technical path and direction for energy conservation and consumption reduction in chemical enterprises.

Keywords: air separation device; Pipeline system; Energy consumption analysis; Economic evaluation; optimization strategy

空分装置在化工企业中承担着为各工艺单元提供各等级氧气、氮气等工业气体的重要任务, 其能耗水平直接影响企业的经济效益和能耗指标。据统计, 空分装置能耗占化工企业总能耗的 25~35%, 而管道系统作为连接各工艺环节的关键纽带, 其能耗损失不容忽视。当前化工企业面临原材料成本上升、环保要求趋严等多重压力, 迫切需要通过技术手段降低生产成本。管道系统的能耗主要来源于流体输送的阻力损失、保温不良造成的热损失以及设备运行的电力或蒸汽消耗。

1 化工企业空分装置管道系统现状分析

1.1 空分装置管道系统构成

现代化化工企业的空分装置管道有高度一体化的特点, 它主要包含四大子系统也就是原料空气输送网、产品气体配给系统、液体储运管线以及辅助工艺管道, 原料空气输送部分一般采用大口径碳钢管, 其管径通常在 DN800 ~ 1200mm 范围之间, 设计压力 0.8 ~ 1.2MPa, 并且设置了多工段净化系统来保证空气质量。产品气体配给按照用户需求布置成高、中、低压多级供气网络, 其中高压氧气管道采用不锈钢材质制造, 设计压力能够达到 10MPa; 中压氮气管线选用合金钢,

设计压力能够达到 8MPa, 液体储运管线是系统的核心部分, 液氧和液氮储罐与各用气点通过真空绝热管道连接起来, 管径一般是 DN50 ~ 300mm, 外包不锈钢护套、内填充珠光砂保温材料, 我单位新建最大常压储槽有效容积 1000m³, 还配备了相应的液体泵与汽化器^[1]。在图 1 所示工艺流程里, 整个管网在平面和立体上形成网状布局, 通过合理的标高与走向设计实现各工艺单元的紧密衔接, 三套空分装置共同使用同一套液体储运体系, 设计方面可大幅降低管道施工费用与占地需求。

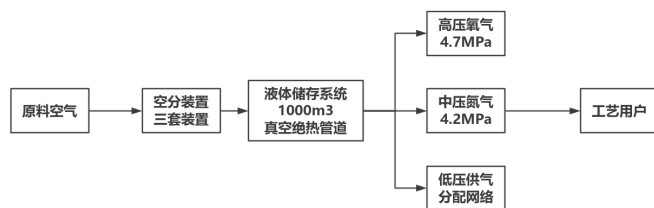


图 1 化工企业空分装置管道系统工艺流程图

1.2 管道系统能耗特征分析

空分系统的管道网络能耗有着明显的多元化分布特点, 流体输送所需动力消耗约占总管道能耗 45 ~ 55%, 核心是各类泵、加热器等设备电力消耗, 像液

氧泵、液氮泵以及循环水泵等关键设备的持续工作。热损失是能耗结构里另一大组成部分, 约占 30 ~ 40%, 是因为低温液体输送时与环境温差大, 即使采用真空绝热材料, 仍会通过传导、对流和辐射等热传递方式造成冷量损失, 管道接头、阀门与仪表连接部位特别明显存在结冰等现象, 压损导致的能耗约占 15 ~ 25%, 这和管道内壁粗糙度、弯头数量、管径选择以及流速设定等因素紧密相关, 当地气体或产品气体在管道中流动时, 因粘性剪切与局部阻力需提升动力设备的功率克服阻力损失^[2]。辅助设备能耗占比相对较小, 大致在 5 ~ 10%, 但包含保温系统的电热带、管道伴热设施以及各类监测仪表的电力消耗, 这些设备持续运行对系统整体能效有不可忽视的影响。

1.3 管道系统能耗影响因素

管网系统的能耗是由设计参数、运行状态以及维护水平等多种因素共同来决定的, 其中管径的选择和流速的控制属于最关键的设计项目。管径过小会引起流速升高并且使阻力损失迅速增加, 而管径过大则会造成初期投资过高还会在低负荷运行时效率下降。在工程实践当中, 为了达到经济性的要求, 液氧管道常会把流速控制在 1.5~2.5 m/s, 液氮管道通常则会设定为 2.0~3.0 m/s。保温层的设计质量直接影响着热损失的情况, 传统岩棉在潮湿条件下容易吸潮, 保温效果会大幅下降, 为解决低温跑冷损失, 现场使用气凝胶保温材料前期投入比较大, 但可将热损失降低约 40 ~ 50%。在液体输送管路的关键部位采用多层保温结构, 也能够显著减少冷量损失。运行工况的波动对能耗有着明显的影响, 当生产负荷在 50 ~ 110% 区间波动的时候, 管网往往难以同步保持最佳运行状态, 从而在部分工况下出现效率下降的情况, 这在开车、工况异常等低负荷时段尤为明显, 所以需要通过智能控制系统实现负荷的动态匹配和设备的协调运行^[3], 是现阶段提高节能控制的有效手段。

2 管道系统优化技术与实施

2.1 真空管道系统应用与冷量回收

真空隔热管路系统会在双层管道之间建立起压力小于或等于 0.1Pa 的高真空环境, 并且结合多层反射屏和珠光砂填充材料构成复合保温结构, 以此将液体管道的热损失降低到最低程度^[4]。新疆某化工有限公司在三套 82000Nm³/h 等级空气分离装置里采用统一的液体储存与输送系统设计, 其中有效容积为 3000m³ 的常压液氧、液氮储槽通过 DN150 ~ 300mm 规格的真空隔热管道和各工艺单元相连接, 外护管使用 304 不锈钢来进行防腐处理, 内管选用 316L 不锈钢以确保产品的质量。冷量回收的核心要点是设置稀有气体

初提装置的备用液氧泵系统, 当主冷凝蒸发器需要排放液氧来防止碳氢化合物聚集的时候, 通过启动备用液氧泵把原本要排放的液氧重新送进高压氧气管网或者回流到液氧储槽, 避免每小时大约 500 ~ 800 kg 液氧直接排放造成损失, 在提高经济效益的同时显著降低现场排放噪声对操作人员健康产生的影响。

2.2 压缩机组一拖二技术与变频控制改造

一拖二压缩机组用单台汽轮机同时驱动空压机和空气增压机的集成设计, 靠精密的齿轮箱传动机构来实现功率合理分配, 空压机负责对原料空气进行初步压缩, 把原料空气压缩到 ~ 0.5MPa, 空气增压机在此基础上把预处理后的空气进一步增压到工艺要求的 3 ~ 6.8MPa。如通过改造采用电拖驱动方式, 结合变频离心式控制系统应用能根据下游工艺负荷实时变化动态调整压缩机转速, 转速调节范围是额定转速的 60~110%, 能有效避免传统定频运行模式下的节流损失, 当生产工况稳定且产品气体有富余时通过降低进气导叶开度并适度减少空气处理量实现节能运行, 达到调整快速、经济、稳定的生产需要。针对后续系统故障或检修期间运行调整策略压缩机组负荷可安全降至 70%, 此时空压机功耗按 (1) 进行计算:

$$P = P_0 \left(\frac{Q}{Q_0} \right)^3 \quad (1)$$

其中 P_0 为额定功耗, Q_0 为额定流量, 通过负荷调节来减少蒸汽消耗。

2.3 高效换热器与余热回收系统

高效板翅式换热器用铝制波纹翅片和多通道并联布局, 让传热面积达到传统管壳式换热器的 3 ~ 5 倍, 传热系数提升到大约 800 ~ 1200 W/(m² · K), 使热端温差 ΔT 缩小到大概 2 ~ 3℃, 进而显著降低换热过程的不可逆损失, 该换热器在空气分离装置里主要用于原料空气预冷、产品气体回温和各工艺流股间热量传递, 紧凑结构设计让相同换热能力下设备质量大幅减轻^[5]。通过调研、优化设计, 建设余热回收系统通过多级串联的热交换网络, 可充分回收汽轮机排汽、空压机级间冷却和膨胀机后低温气体携带的热量, 构建覆盖高、中、低三档温度的梯级利用体系, 不仅大幅节约循环冷却水, 回收的乏汽冷凝热还能用于采暖或分子筛再生, 空压机各级冷却器产生的冷凝水和水浴式汽化器的溢流水都被回收并入循环水系统, 进一步降低了新鲜补水量。

2.4 智能化控制与能耗管理系统

可通过立式双层径向流分子筛吸附器配备基于模糊 PID 算法的智能控制策略, 通过实时监测进入吸附

器的空气压力 P 、温度 T 、流量 Q 等关键参数，建立吸附剂负荷预测模型：

$$Q_{ads} = f(P, T, t, C_{H_2O}, C_{CO_2}) \quad (2)$$

其中 C_{H_2O} 和 C_{CO_2} 分别表示空气中水分和二氧化碳的浓度，系统能够自动计算吸附剂中被吸附的水分和 CO_2 累积量，精确确定最佳再生时机和所需热量。智能控制系统优化吸附再生循环时间安排，把原本固定时间切换模式改成依据吸附饱和度动态切换，进而显著降低切换频率并延长吸附剂使用寿命，DCS 分散控制系统和企业能源管理平台深度对接，实现装置级、工段级和班组级三级能耗数据采集与分析，通过建立班组能耗核算竞赛机制和实时数据公开制度，让操作人员积极优化工艺参数挖掘节能潜力。

3 案例分析与效果评估

3.1 某化工企业空分装置优化案例

新疆某化工有限公司年产甲醇制烯烃项目配套的 $82000\text{Nm}^3/\text{h}$ 空分装置是项目核心气源系统，该装置采纳法国液化空气公司先进工艺，配套德国西门子提供的空气压缩机设备形成高度集成工艺单元群。优化改造主要集中在三套空分装置共用的液体储运体系，把原有常规保温管道全面替换成真空保温管并在关键位置增设余冷回收装置，同时对压缩机组实施高系统能效管理，对分子筛净化单元进行智能化升级，配备自动再生控制通过在线监测吸附剂中水分和 CO_2 含量变化来优化再生周期与热耗。改造工程分阶段在不停产条件下实施历时 18 个月，三套空分装置均已平稳投产综合能耗降至 1980.4kg 标煤 / 万 Nm^3 氧气在国内煤制烯烃领域处于领先水平。

3.2 经济效益分析

对新疆某化工企业 $82000\text{Nm}^3/\text{h}$ 空分装置管道系统优化改造项目开展全面经济效益评估之后，能够清楚呈现出各项技术措施所产生的直接经济收益状况与投资回报情况。

从表 1 的数据分析能看出来，本次管道系统综合优化改造总投资达到 1070 万元，每年大约可以节约成本 420 万元，投资回收期是 2.5 年，具备良好的经

济可行性。其中真空管道与冷量回收技术带来的效益最显著，每年大约能节约 182 万元，投资回收期大概是 2.3 年，压缩机组节能改造每年能够节省约 132 万元，投资回收期约为 2.1 年，经济性是最好的高效换热器配合余热回收系统每年可以节约约 94 万元，整体价值比较高。智能化控制系统的升级虽然带来的直接节省有限，每年大约是 12 万元，但对提升自动化水平、降低人员劳动强度、实现节能生产等方面具有积极作用，并为后续优化提供数据支持、借鉴有着重要意义。

4 结语

对化工企业空气分离装置的管道系统做能耗经济性分析和优化，需要综合考虑技术可行性、经济合理性、环保科学性、安全生产必要性等主要方面，通过进行科学评估以及系统性的改进，就能够在最大程度上降低管网的能耗，优化措施要遵循因地制宜、分阶段推进的原则，优先对耗能比较高的环节进行改造，提高生产装置的智能化、稳定性、经济性、节能管理。试验结果显示优化管道布置能够把阻力损失降低 15 ~ 25%，采用性能更加优良的保温材料可以减少热损失 20 ~ 30%，引入集成化的智能控制系统能让运行效率提高 8 ~ 12%，从经济方面来看，管道系统的优化改造投资一般在 2 ~ 4 年内就可完成投资回收，具备比较好的经济性、可行性。未来发展中，运行时间较长的企业要重点推广新型材料和工艺，并且发展基于大数据和人工智能的智慧化管理，以此来支撑化工行业的绿色发展、可持续运营、节能高效管理。

参考文献：

- [1] 焦松涛. 空分装置安全风险管控与事故预防措施 [J]. 中氮肥, 2024, (04): 64-67.
- [2] 杨勇. 空分压缩机厂房噪音治理防范策略 [J]. 化工管理, 2024, (02): 52-54.
- [3] 窦强利. 空分装置节能降耗的实践与思考 [J]. 大氮肥, 2022, 45(04): 281-284.
- [4] 智静波. 煤化工企业大型空分装置安全管理措施 [J]. 化工管理, 2022, (17): 112-114+118.
- [5] 苏昭辉. 结合 HYSYS 仿真模型优化空分装置运行方式 [D]. 华东理工大学, 2020.

表 1 空分装置管道系统优化改造经济效益分析表

项目类别	优化前年运行成本 (万元)	优化后年运行成本 (万元)	年节约成本 (万元)	初期投资 (万元)	投资回收期 (年)
真空管道系统及冷量回收	580	398	182	420	2.3
压缩机组一拖二技术改造	720	588	132	280	2.1
高效换热器及余热回收	450	356	94	220	2.3
智能化控制系统升级	280	268	12	150	12.5
合计	2030	1610	420	1070	2.5