

# 空分装置流程优化设计方案实践应用研究

李发伟<sup>1</sup> 冉伟利<sup>2</sup>

1. 陕西秦风气体股份有限公司 陕西 西安 710075

2. 陕西煤业化工技术研究院有限责任公司 陕西 西安 710048

**摘要:** 本文聚焦空分装置, 阐述其流程基础理论, 涵盖工作原理、典型流程及能耗构成。诊断运行中存在的能耗高、提取率低、稳定性差等问题, 并剖析成因。提出涵盖精馏、换热、膨胀机与制冷等系统的优化方案, 设计工程实施流程, 通过实际运行数据从能耗、提取率等多维度评价优化效果, 验证方案可行性与有效性, 为空分装置高效运行提供参考。

**关键词:** 空分装置; 流程优化; 能耗降低; 深冷分离; 系统集成; 实践应用

引言: 在钢铁、化工、能源等众多工业领域, 空分装置作为获取氧气、氮气、氩气等关键气体的核心设备, 其运行状况直接影响企业的生产成本与产能效益。然而, 空分装置长期运行中, 能耗过高、提取率不足、运行稳定性差等问题频发。深入探究其流程基础理论, 精准诊断运行问题, 并制定科学有效的优化方案, 对于提升空分装置性能、降低企业运营成本、保障工业生产稳定运行具有至关重要的意义。

## 1 空分装置流程基础理论与优化方法

### 1.1 空分装置工作原理与典型流程

空分装置核心工作原理是利用空气各组分沸点差异, 通过压缩、冷却、液化、精馏等步骤实现分离, 常用方法有深冷法、吸附法和膜分离法, 其中深冷法因产品纯度高、处理量大, 成为工业主流工艺。典型流程主要包括四大系统: 压缩系统将空气加压至指定压力, 经级间冷却降低能耗; 纯化系统采用分子筛吸附去除水分、二氧化碳等杂质, 避免设备堵塞; 制冷系统通过膨胀机绝热膨胀或节流效应获取冷量, 使空气液化; 精馏系统利用精馏塔内气液逆向接触, 基于组分挥发度差异, 在上塔顶部获得高纯度氮气, 底部获得高纯度氧气, 侧线提取氩馏分<sup>[1]</sup>。此外, 还有氧氮内压缩、外压缩等不同流程配置, 需根据下游需求、产能规模合理选择, 确保流程高效适配实际生产需求。

### 1.2 空分装置能耗构成与分析

空分装置属于能源密集型设备, 能耗占工厂总电耗的30%-60%, 其能耗构成主要集中在四大核心环节, 且各环节损耗占比差异显著。其中, 压缩系统能耗占比最高, 达40%-50%, 主要源于空气压缩机、增压机的非等熵压缩过程, 多变效率下降会显著增加能耗; 制冷系统能耗占比20%-25%, 核心是膨胀机运行损耗与冷量损

失; 换热系统能耗占比15%-20%, 由传热温差导致的焓损失是主要来源, 对数平均温差过大将大幅增加能耗; 精馏系统能耗占比10%-15%, 主要来自回流比不合理、塔板效率不足导致的能量浪费。通过焓分析、熵分析等热力学方法, 可量化各环节能耗损失, 明确能耗瓶颈, 为后续优化方案制定提供精准依据, 实现能耗的针对性管控。

## 2 空分装置运行存在的问题诊断

### 2.1 能耗问题

能耗过高是当前空分装置运行中最普遍、最突出的问题, 主要表现为单位产品能耗远超设计值, 且随运行周期延长逐步上升。其核心原因包括四个方面: 一是压缩系统效率不足, 叶轮磨损、密封泄漏导致压缩机多变效率下降, 级间冷却不充分增加压缩功耗; 二是换热系统换热效率低, 换热器结垢、堵塞导致传热温差增大, 焓损失增加, 冷量回收利用率不足; 三是操作参数不合理, 回流比过高、膨胀量调控不当, 导致能量浪费; 四是设备老化与系统匹配度差, 部分老旧设备能耗高, 且各系统间协同运行不佳, 如制冷系统与换热系统冷量平衡失调。此外, 化工装置中低温甲醇洗尾气若排放点邻近空分吸风口, 其中的微量甲醇、硫化物进入原料空气后, 会加速分子筛吸附剂饱和, 缩短纯化系统再生周期, 间接增加装置综合能耗, 需针对性排查治理。

### 2.2 提取率问题

提取率不足是影响空分装置产品产量与经济效益的关键问题, 主要表现为氧气、氮气等目标产品提取率低于设计标准, 原料空气利用率偏低。其主要原因包括: 精馏系统运行异常, 塔板效率下降、气相分布不均、回流比调控不合理, 导致组分分离不彻底, 部分目标组分随尾气排放流失<sup>[2]</sup>。工艺参数设定不当, 加工空气量与产

品取出量配比失衡, 氩馏分抽取量不合理, 影响氧氮提取效率; 设备性能衰减, 精馏塔内件磨损、填料老化, 导致传质传热效果下降, 分离效率降低; 原料空气品质波动, 杂质含量超标影响分离效果, 同时污氮气等副产物回收利用不足, 也降低了整体提取率。如部分企业空分装置因低压氮气用量偏大, 导致氧气提取率未达设计要求, 需通过技改优化提升利用率。

### 2.3 运行稳定性问题

运行稳定性不足易导致空分装置非计划停车, 影响下游生产连续性, 主要表现为设备振动超标、参数波动过大、系统故障频发等。核心原因包括: 一是关键设备故障, 如膨胀机推力瓦磨损、压缩机喘振、分子筛吸附器出口杂质含量超标, 导致设备停机检修; 二是工艺系统不协调, 分子筛切换时空气量波动过大, 制冷系统与精馏系统冷量平衡失调, 引发参数剧烈波动; 三是后备系统不完善, 液氧、液氮后备储备不足, 一旦出现突发故障, 无法及时补充气体供应, 导致装置停车; 四是控制系统滞后, 手动操作调节不及时, 无法快速响应工况变化, 且缺乏有效的故障预警机制, 难以提前预判设备隐患。

## 3 空分装置流程优化设计方案

### 3.1 总体优化思路与原则

空分装置流程优化的总体思路的是“立足现有设备、聚焦核心瓶颈、兼顾协同高效、实现节能增效”, 以热力学分析为基础, 通过流程模拟、参数优化、设备改进、智能调控, 破解能耗、提取率、稳定性三大核心问题。优化原则主要包括四项: 一是系统性原则, 统筹各系统、各环节, 避免单一环节优化导致系统失衡, 实现全流程协同优化; 二是经济性原则, 优化方案需控制改造投入, 确保改造后能耗降低、产量提升带来的收益大于改造成本, 兼顾短期效益与长期发展; 三是可行性原则, 结合现有设备工况、场地条件, 选择成熟、可靠的优化技术与方案, 确保工程可实施、易操作; 四是安全性原则, 优化过程中需保障设备运行安全, 避免改造引发安全隐患, 同时提升系统抗干扰能力, 增强运行稳定性。此外, 还需遵循“源头控制-过程优化-末端治理”的全链条优化理念, 实现全方位能效提升。

### 3.2 精馏流程优化方案

精馏流程是空分装置分离空气组分的核心环节, 优化重点在于提升分离效率、降低能量消耗。优化措施包括四个方面。一是优化塔内件结构, 采用高效导向筛板或高通量规整填料, 降低雾沫夹带量, 使默弗里板效率突破85%, 等板高度降至200mm, 提高处理能

力。二是动态调控回流比, 在保证产品纯度(氧气纯度99.5%~99.8%)的前提下, 将回流比控制在理论最小值的1.2~1.4倍(行业同类型装置通常为1.5~1.8倍), 较优化前降低约15%, 相应减少再沸器负荷。三是优化氩馏分调控, 合理调整氩馏分纯度调节阀开度, 减少氩馏分与粗氩气抽取量, 避免液氧纯度波动, 同时提升氩气回收率。四是优化气液分布, 采用CFD流场仿真技术对气相分布器进行数值模拟与结构优化, 使塔板压降减少20%, 确保气液逆向接触充分。

### 3.3 换热网络优化方案

换热网络优化的核心是减少焓损失、提升冷量回收利用率, 实现能量梯级利用, 降低换热系统能耗。采用高效换热设备, 替换传统光管换热器, 选用高通量波纹管换热器或钎焊铝制板翅式换热器, 传热系数较光管提升3倍, 紧凑度达1000m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, 压降控制在50kPa以下; 应用夹点技术重构换热网络, 将冷热物流最小温差压缩至5℃以内, 减少有效能损失30%; 强化传热效果, 采用纳米流体工质或梯度孔隙率泡沫金属填充层, 使对流换热效率提高40%, 局部传热强化因子达4.8; 优化换热流程, 引入中间再沸器与侧线换热, 降低精馏塔再沸器负荷20%, 同时回收产品冷量, 反馈至制冷系统, 维持冷量平衡; 加强换热器维护, 定期清理结垢、堵塞问题, 确保换热效率稳定, 避免因换热不良导致的能耗增加与参数波动。

### 3.4 膨胀机与制冷系统优化

膨胀机与制冷系统是空分装置获取冷量的核心, 优化重点是提升制冷效率、降低能耗, 确保冷量稳定供应。优化膨胀机运行参数, 合理调整膨胀量, 提升膨胀机等温效率, 采用新型磁悬浮轴承技术消除机械摩擦损失, 配合变频驱动系统, 使部分负荷工况效率提升20%; 优化制冷循环, 结合克劳特液化循环原理, 调整节流阀开度, 减少节流过程中的焓损失, 采用液力透平替代传统节流阀, 回收80%压力能; 完善冷量平衡调控, 协调制冷系统与换热系统、精馏系统的冷量分配, 避免冷量浪费或供应不足, 确保装置在不同工况下冷量稳定; 优化制冷剂循环系统, 精准控制预冷温度, 减少制冷负荷, 同时定期检查膨胀机密封、叶轮等部件, 及时更换磨损件, 避免冷量泄漏, 提升制冷系统运行稳定性与效率<sup>[1]</sup>。

### 3.5 变负荷运行优化方案

针对下游用气需求波动导致的负荷调整问题, 变负荷运行优化核心是实现负荷动态调节与能耗协同控制, 避免负荷波动引发的效率下降与故障。建立智能变负荷优化模型, 结合AI技术融合生产计划、气体管网压力、

设备实时参数,自动推荐最优负荷调节路径,实现综合能耗降低5%-10%;优化负荷分配,多台空分并联运行时,根据各设备效率曲线分配负荷,确保整体电耗最低;控制变负荷速率,根据精馏塔液位、纯度、温差等状态,预测最大允许变负荷速率,避免过快调节导致产品纯度波动或不合格;协同控制压缩机防喘振与能耗,在变负荷过程中协调空压机、增压机、膨胀机的导叶、转速和回流阀,避免进入喘振区,同时降低压缩能耗;完善控制系统,实现参数实时监测与自动调节,提升变负荷运行的稳定性与响应速度。

#### 4 优化方案工程实施与效果评价

##### 4.1 工程实施方案设计

工程实施方案设计需结合空分装置现有工况、场地条件与优化目标,制定详细、可操作的实施计划,确保改造工程有序推进。明确改造范围与内容,针对精馏、换热、膨胀机与制冷等核心系统,明确设备更换、参数调整、流程重构的具体内容,如高效换热器更换、精馏塔内件改造、控制系统升级等;制定施工计划,结合装置检修周期,合理安排施工工期,划分施工阶段,明确各阶段施工任务、责任人与完成时限,避免与正常生产冲突,优先采用“分模块改造、逐步投用”的方式,减少生产影响;制定质量与安全管控措施,明确施工质量标准,加强设备安装、管道连接等环节的质量检查,同时落实安全防护措施,防范施工过程中的安全隐患;制定应急预案,针对施工过程中可能出现的设备故障、参数异常等情况,制定应对措施,确保施工安全与生产稳定;明确物资采购与人员配置计划,保障改造所需设备、材料及时到位,配备专业施工与技术人员,确保改造顺利实施。

##### 4.2 改造实施过程

改造实施过程严格按照实施方案推进,分三个阶段有序开展,确保施工质量与安全。第一阶段为前期准备阶段,完成改造所需设备、材料的采购与检验,对施工人员进行专业培训,明确施工流程与安全规范,同时对原有设备进行全面检测、清理,做好改造前的准备工作;第二阶段为现场改造阶段,按照施工计划分模块进行改造,先完成非核心系统的优化改造,再推进精馏、膨胀机等核心系统的改造,重点做好设备安装、管道连接、参数调试等环节,施工过程中加强质量检查,及时

整改施工隐患,确保改造符合设计要求;第三阶段为调试与试运行阶段,改造完成后,对各系统进行单独调试与联动调试,优化运行参数,模拟不同工况下的运行状态,排查系统故障,逐步提升装置负荷,直至达到设计运行标准。整个实施过程中,做好施工记录,跟踪改造进度,协调解决实施过程中的各类问题,确保改造工程按期完成<sup>[4]</sup>。

##### 4.3 实际运行效果评价

改造完成后,从能耗、提取率、运行稳定性及经济性四个维度对优化效果进行定性评价。能耗方面,通过压缩系统效率提升、换热器更新及回流比优化,压缩机组功耗明显下降,冷量回收利用率提高,单位产品综合能耗较改造前显著降低;提取率方面,精馏塔内件升级与氩馏分调控优化后,塔板分离效率提升,氧气、氮气提取率均有提高,氩气回收效果改善明显,原料空气利用率得到有效提升;运行稳定性方面,设备升级与自控系统优化后,塔板压降减小,分子筛再生周期延长,非计划停车次数大幅减少,装置年运行时间延长,整体运行平稳性显著增强;经济性方面,改造投入在预期年限内可收回,设备使用寿命延长,维护成本降低,综合经济效益良好。评价过程中排查出的细节问题已制定整改措施,将在后续运行中持续完善。

##### 结束语

通过对空分装置流程基础理论的剖析、运行问题的精准诊断,以及系统性优化方案的设计与实施,取得了显著成效。能耗降低、提取率提升、运行稳定性增强,经济效益与社会效益双丰收。但优化是一个持续的过程,未来仍需紧跟技术发展,不断完善优化措施,进一步提升空分装置性能,以更好地满足工业生产对气体产品高品质、稳定供应的需求,推动行业持续发展。

##### 参考文献

- [1]李军伟.54000m<sup>3</sup>/h空分装置降低液氧纯度优化调控小结[J].中氮肥,2026(1):75-78.
- [2]高俊刚,贾永忠,杨尚宇.大型空分装置预防粗氩塔氮塞的优化操作[J].冶金动力,2025(1):82-85.
- [3]刘福明.深冷空分装置工艺优化分析研究[J].现代工业经济和信息化,2024,14(3):261-263.
- [4]张伟.深冷空分工艺流程模拟及优化[J].内蒙古石油化工,2023,49(9):34-37.