

大型煤化工项目空分装置的总体安全设计剖析

王 涛 田松涛

浙江巴陵恒逸己内酰胺有限责任公司 浙江 杭州 311200

摘要: 大型煤化工项目空分装置能将空气分离为多种工业气体,为煤化工反应提供原料,其运行稳定性影响项目安全生产效率。该装置运行环境复杂,存在介质、设备、工艺、环境与操作等风险。其总体安全设计涵盖选址、工艺流程、设备选型、安全监控等多方面核心要素。通过基于风险评估的设计改进、智能化安全设计、标准化与法规遵循等优化策略,以及完善安全管理体系与应急设计,可提升装置安全性,保障其稳定运行。

关键词: 煤化工;空分装置;安全设计

引言:在大型煤化工项目中,空分装置扮演着关键角色,其作用是将空气分离成氧气、氮气等工业气体,为后续的煤化工反应提供必不可少的原料。然而,空分装置运行环境复杂,介质多为低温、高压、易燃易爆类型,面临着诸多安全风险,一旦发生事故,后果不堪设想。因此,对大型煤化工项目空分装置进行全面且深入的总体安全设计剖析,具有重要的现实意义,是保障项目安全生产、稳定运行的关键所在。

1 大型煤化工项目空分装置安全设计的基础理论

1.1 空分装置工作原理与工艺流程

大型煤化工项目空分装置核心功能是将空气分离为氧气、氮气、氩气等工业气体,为煤化工反应提供关键原料,其运行稳定性直接决定项目安全生产效率。工作原理基于空气深冷分离技术,先通过空气过滤器去除灰尘、杂质,经空压机压缩至指定压力,再进入预冷系统冷却至接近露点温度,随后通过纯化系统脱除水分、二氧化碳、碳氢化合物等有害组分,避免后续设备堵塞或发生危险反应。纯化后的洁净空气送入冷箱,经主换热器进一步降温,进入精馏塔实现组分分离——氧气、氮气因沸点差异在塔内逐级精馏,最终获得高纯度产品,经储罐储存或直接输送至下游工段^[1]。工艺流程涵盖压缩、预冷、纯化、精馏、储存五大环节,各环节紧密衔接,任一环节出现异常均可能引发连锁风险,因此流程设计需兼顾高效性与安全性,确保介质输送、温度压力控制等参数处于安全阈值内。

1.2 空分装置安全风险分类

大型煤化工空分装置运行环境复杂,介质多为低温、高压、易燃易爆类型,安全风险可按来源分为四类核心类型。一是介质风险,空气纯化不彻底残留的碳氢化合物在冷箱内积聚,易引发爆炸;低温液态气体泄漏会导致人员冻伤、设备脆裂,高压气体泄漏则可能造成

喷射伤害。二是设备风险,空压机、精馏塔、换热器等核心设备长期在极端工况下运行,易出现腐蚀、疲劳破损、密封失效等问题,引发介质泄漏。三是工艺风险,温度、压力、液位等参数偏离设计值,可能导致精馏塔液泛、主换热器堵塞等故障,诱发连锁反应。四是环境与操作风险,煤化工厂区粉尘、腐蚀性气体较多,易影响设备运行;操作人员误操作、违规启停设备,或应急处置不当,会加剧风险扩散。各类风险相互关联、叠加,需精准识别分类,为安全设计提供靶向依据。

2 空分装置总体安全设计的核心要素

2.1 选址与总图布置安全设计

选址与总图布置是空分装置安全设计的前提,直接影响风险防控边界与应急处置效率,需严格遵循煤化工行业安全规范与区域规划要求。选址需避开地震带、洪水淹没区、地质松软区域等自然灾害高发地段,同时远离居民区、学校、医院等敏感场所,设置足够的安全防护距离,且需考虑原料运输便利性与应急疏散通道可达性。总图布置需遵循“功能分区、风险隔离”原则,将空分装置与煤化工核心反应区、储罐区、装卸区等高危区域保持安全间距,划分独立的生产区、辅助区、应急区。装置内部布局需优化介质输送路径,缩短高压、低温管道长度,避免管道交叉重叠;冷箱、空压机、纯化系统等设备按工艺流程有序布置,预留足够的检修空间与消防通道^[2]。同时,需结合风向条件合理规划设备位置,将可能产生泄漏的设备布置在下风向,减少有害介质扩散对人员与其他设备的影响,同步配套消防设施、防护堤等安全设施,构建全方位的外部防护体系。

2.2 工艺流程安全设计

工艺流程安全设计是空分装置安全运行核心,要在保障分离效率基础上降低连锁风险。优化介质处理流程,强化纯化系统,采用双吸附塔交替运行,确保杂质脱除达

标,避免冷箱内积聚引发爆炸;精馏塔进出口设在线分析仪表,实时监测调整。设置冗余防护流程,关键环节增设旁路系统,主流程故障时可快速切换;高压部位设安全阀等泄压装置。优化温度控制流程,通过参数联动调节维持冷箱低温稳定。另外,流程设计兼顾可操作性与应急性,简化操作环节,减少人为干预,为自动化控制与应急处置提供便利,保障装置安全稳定运行。

2.3 设备选型与材料安全

设备选型与材料安全决定空分装置抗风险能力,需结合工况特点把控质量。核心设备选型优先符合安全规范、具备防爆防泄漏功能的产品,如空压机高效节能且能自动调压,精馏塔耐低温抗疲劳,储罐双层密封并配泄漏检测装置。材料选择适配工况,冷箱等用耐低温不锈钢,接触腐蚀性介质的用耐腐蚀合金或防腐涂层。强化设备密封性能,低温高压部位多重密封。选型考虑检修便利性与兼容性,确保备品备件易获取。对设备进行出厂检验与现场调试,验证性能与材料适配性,杜绝不合格设备投入使用。

2.4 安全监控与自动化控制

安全监控与自动化控制是空分装置风险预警与快速处置的关键,需构建“实时监测、自动调节、异常报警”的一体化控制系统。安全监控系统需覆盖全流程关键参数,在空压机、精馏塔、储罐等设备设置温度、压力、液位、组分含量等在线监测仪表,数据实时传输至控制中心,同时在冷箱、密封点等易泄漏部位设置气体检测传感器,及时捕捉介质泄漏信号。自动化控制系统采用分布式控制系统(DCS),实现对压缩、预冷、纯化、精馏等环节的集中控制,通过预设控制逻辑,当参数偏离安全阈值时,系统自动触发调节指令,如调整空压机转速、切换吸附塔、开启泄压装置等,避免风险扩大。针对高危环节增设紧急停车系统(ESD),当发生重大异常时,系统可快速切断关键设备电源、关闭介质阀门,实现装置安全停机。同时控制系统需具备数据存储、追溯功能,为风险分析与设计优化提供数据支撑,同步配套声光报警装置,确保异常信号及时传递给操作人员。

3 大型煤化工项目空分装置安全设计的优化策略

3.1 基于风险评估的设计改进

基于风险评估的设计改进是提升空分装置安全性能的动态优化手段,需建立全生命周期风险评估体系,实现设计与风险防控的精准匹配。首先开展前期风险识别,结合同类项目事故案例、装置工艺流程与工况特点,采用HAZOP(危险与可操作性分析)、JSA(作业

安全分析)等方法,全面梳理介质、设备、工艺、操作等环节的潜在风险,明确风险等级与影响范围。针对高风险环节开展专项评估,如碳氢化合物积聚、设备密封失效、参数波动等,分析风险产生的根源,制定针对性的设计改进措施。例如,针对碳氢化合物积聚风险,优化纯化系统吸附剂选型与再生周期,增设冷箱内碳氢化合物在线监测与排放装置;针对设备泄漏风险,改进密封结构设计,增加泄漏检测点位。定期开展运行阶段风险复评,结合设备磨损、工艺调整、环境变化等因素,动态更新风险清单,对设计缺陷进行迭代优化,形成“评估—改进—验证—复评”的闭环管理模式,持续提升装置安全设计水平^[3]。

3.2 智能化安全设计趋势

智能化技术的应用的是空分装置安全设计的核心发展趋势,通过数字化、智能化手段,实现风险的提前预警、精准管控与高效处置。在设计中融入人工智能(AI)算法,对监控系统采集的温度、压力、组分含量等海量数据进行分析,构建风险预测模型,提前识别设备故障、工艺异常的潜在征兆,实现从“被动应对”到“主动预防”的转变。采用数字孪生技术,构建空分装置虚拟仿真模型,同步映射物理设备的运行状态,可模拟不同工况下的风险演化过程,为设计优化、操作培训、应急演练提供虚拟场景支撑,降低实际运行风险。智能化设计还包括无人化操作场景搭建,在高危区域设置智能巡检机器人,替代人工完成设备巡检、泄漏检测等工作,减少人员暴露风险;通过工业互联网平台实现设备、系统、人员的协同管控,打通安全监控、自动化控制、应急管理 etc 系统的数据壁垒,实现异常情况的快速响应与联动处置,大幅提升装置安全运行的智能化、精细化水平。

3.3 标准化与法规遵循

标准化与法规遵循是空分装置安全设计的底线要求,需严格依据国家、行业相关标准规范,确保设计的合规性、科学性与可靠性。在设计过程中,需遵循《大型空分装置安全技术规范》《煤化工安全规程》《压力管道安全技术监察规程》等核心法规标准,明确设备选型、工艺流程、总图布置、安全设施等方面的强制性要求,杜绝违规设计。同时借鉴国际先进标准与行业最佳实践,结合大型煤化工项目的特殊性,制定企业内部安全设计标准,细化设计流程、技术参数、质量控制等环节的要求,实现设计工作的标准化、规范化。需建立法规标准动态更新机制,及时跟踪国内外相关标准的修订情况,将新增要求融入设计工作,确保装置安全设计与

行业发展、法规更新保持同步。在设计验收阶段,严格按照标准规范开展检验检测工作,对设计成果进行合规性审核,确保装置从设计源头符合安全要求,为后续安全运行奠定坚实基础。

4 安全管理体系与应急设计

4.1 安全管理制度

完善的安全管理制度是空分装置安全设计落地与长效运行的保障,需构建覆盖全流程、全人员的制度化管理体系。建立分级责任制,明确设计、施工、运行、维护等各环节的安全职责,将安全责任落实到具体岗位与个人,形成“全员参与、层层管控”的责任体系。制定设备安全管理制度,规范空压机、精馏塔、储罐等核心设备的日常巡检、维护保养、检修流程,明确检修周期、技术标准与安全要求,防止设备因维护不当引发故障;制定操作安全管理制度,细化操作人员的岗位职责、操作流程、应急处置权限,严禁违规操作,定期开展安全培训与考核,提升操作人员安全意识与技能水平。建立安全检查与考核制度,定期开展专项安全检查、综合安全检查,及时排查设计、运行、管理中的安全隐患,对隐患整改情况进行跟踪督办;完善安全奖惩机制,将安全绩效与岗位考核挂钩,激励全员遵守安全制度,筑牢安全管理防线。

4.2 应急预案设计

应急预案设计需针对空分装置可能发生的介质泄漏、爆炸、设备故障等突发事件,构建“预防为主、快速响应、科学处置”的应急体系。首先制定专项应急预案,针对不同类型突发事件明确应急组织机构、职责分工、处置流程,如介质泄漏应急处置预案需明确泄漏点定位、应急隔离、泄漏物收集、人员疏散等关键环节;火灾爆炸应急预案需明确消防设施启用、灭火策略、人员撤离路线等内容。其次完善应急资源配置,在装置区域合理布置消防栓、灭火器、防护面罩、应急照明等应急器材,配备专用应急救援设备与物资,确保突发事件发生时能够快速调配使用;建立应急通讯保障体系,确保应急指挥、现场处置、外部救援之间的通讯畅通,及时传递应急信息^[4]。同时制定应急演练计划,定期开展实战化应急演练,模拟不同工况下的突发事件,检验应急预案的可行性、应急队伍的处置能力,针对演练中发现的问题优化应急预案,提升

应急处置的科学性与高效性。

4.3 数字化安全监控平台

数字化安全监控平台是整合安全管理资源、提升风险管控效率的核心载体,需依托工业互联网、大数据技术,构建一体化、可视化的安全监控体系。平台整合安全监控系统、自动化控制系统、设备管理系统、应急管理系统的数据库资源,实现温度、压力、泄漏信号、设备运行状态、应急资源分布等信息的集中展示,通过可视化界面为管理人员提供全面、实时的安全运行态势。平台具备数据分析、预警研判功能,可对异常数据进行自动分析,生成风险预警信息,推送至相关管理人员,为快速处置提供决策支撑;同时具备数据追溯与统计功能,可自动生成安全运行报表、隐患整改报表,为安全管理考核与设计优化提供数据依据。平台需融入应急处置模块,当发生突发事件时,可快速调取应急预案、应急资源位置、人员疏散路线等信息,实现应急指挥的数字化、精准化;支持移动端访问,方便管理人员随时随地掌握装置安全状态,及时处理异常情况,构建全方位、全天候的数字化安全管控网络。

结束语

大型煤化工项目空分装置的总体安全设计是一项复杂且系统的工程,涉及多个关键要素与环节。通过全面剖析其安全设计要点,从选址布局到工艺流程优化,从设备选型到安全监控,再到优化策略与安全管理体系构建,形成了一套较为完善的安全设计框架。未来,随着技术的不断进步,需持续探索创新,进一步提升空分装置的安全性能,为大型煤化工项目的安全生产提供更坚实的保障。

参考文献

- [1]黄守斌.大型煤化工项目空分装置的总体安全设计剖析[J].内蒙古石油化工,2023,49(11):35-38.
- [2]高飞.大型现代煤化工项目二氧化碳排放对空分装置影响评价及应对措施[J].中国化工贸易,2020(24):254-256.
- [3]张亚男.煤化工项目空分装置建设方案研究[J].石化技术,2025,32(8):442-443,370.
- [4]牛宝玉,刘培龙,袁文章.大型煤化工项目跨装置联锁研究与应用[J].中氮肥,2023(2):6-10.