

基于化工企业空分装置的安全运行管理探讨

韦世人

广西来宾海湾空分气体有限公司，广西来宾市兴宾区凤凰镇，546102；

摘要：空分装置作为化工企业中氧、氮、氩等关键气体的供应核心，其运行安全直接关系到整个生产系统的稳定性与安全性。由于空分过程涉及深冷、高压、高氧浓度等典型工况，设备运行一旦出现偏差，极易引发燃烧爆炸、低温冻裂或供气中断等重大事故。针对当前化工企业中空分装置运行管理中存在的操作不规范、设备老化与自动化控制不足等突出问题，本文从空分装置的工艺特征与事故类型出发，系统梳理其运行安全的关键风险点，深入剖析管理中的常见漏洞，并结合典型案例提出流程标准化、设备精细管理与智能化预警体系建设等改进对策，以期为空分系统的本质安全运行提供实践参考。

关键词：空分装置；化工安全；运行管理；隐患防控；设备监控

DOI：10.69979/3060-8767.25.07.068

引言

在现代化工生产体系中，空分装置承担着为下游装置连续提供高纯度氧气、氮气及稀有气体的功能，其运行的连续性与安全性成为整个工厂稳定运行的基础支撑。由于空分工艺中存在深冷操作、高压传输以及可与可燃性介质的协同使用，系统一旦发生失控，可能导致设备损毁、人员伤亡乃至大范围停产，造成严重经济与安全风险。

现实生产中，空分装置的运行安全管理面临多重挑战。一方面，传统操作模式下的人工经验依赖较强，规范执行存在波动；另一方面，设备系统复杂、故障类型多样，检修维护周期管理压力大；同时，部分装置在自动化与智能化建设方面仍相对滞后，导致隐患发现不及时、响应机制不健全。基于此，本文立足典型化工企业空分运行场景，从工艺风险出发，探讨管理体系中存在的问题与对策路径，旨在推动化工企业在安全管理模式上的结构性优化。

1 空分装置运行特性的安全敏感性

1.1 高压低温运行状态下的设备应力集中问题

空分装置在制氧、制氮过程中普遍采用高压压缩与低温液化工艺，其中空压机、换热器与冷箱等设备长期处于应力交叠状态。特别是在快速启停或负荷波动情况下，金属材质易在应力集聚点出现疲劳裂纹。部分管线由于绝热层老化或安装不规范，易在冷热交替过程中形成微裂变形，埋下泄漏隐患。更为复杂的是，系统部分

部位长期处于接近液化点的低温环境，极易诱发冷脆现象，尤其在合金材料韧性不足的情况下风险加剧^[1]。例如液氧泵入口管段，在局部压强扰动与温度骤降叠加时，可能因材质脆裂诱发结构失效。若无在线监测或补偿机制，一旦失控，极易造成装置系统级安全事故。

为保障运行安全，应在设计阶段引入热应力仿真与疲劳寿命预测机制，依据各构件热工参数动态调整使用年限，并建立临界部位的定期探伤制度。通过工艺缓冲程序设计与设备材料升级，可在源头上减少应力引发的结构性风险。

1.2 纯氧环境中的火灾爆燃风险特征

空分装置中的纯氧提取与输送系统构成典型的富氧环境，一旦与油脂、颗粒物或泄漏气体形成混合区，极易引发剧烈燃烧甚至爆炸。在充放液、压力波动、非标操作等条件下，金属管道中的局部热斑或火源极易点燃高浓度氧气区域，形成链式热解反应^[2]。

典型事故中，氧气阀门密封不严导致泄漏，接触残留润滑油后在高压喷射点形成局部高温，引燃下游管线并造成火焰回流。另有案例表明，未清洁干净的内壁表面中微小颗粒物在氧气高速冲击下也可瞬间升温至自燃点，诱发系统性爆燃事故。

在系统设计上应避免死角积尘区域，选用抗氧化、低燃点的密封材料，同时强化设备管线预清洗与气密试压管理。在操作环节，则应设置富氧操作区强制审批机制，并在充氧区域实施“红线控制”——即不得使用任

何含油部件或非氧专属工具。

1.3 工艺链路耦合对事故扩散范围的放大效应

空分装置各子系统如压缩、净化、分离、储运之间具有高度耦合性，一处环节失控常常导致级联反应。以空压机跳停为例，若未同步联动调节膨胀机流量与液氧储罐压力，极易造成系统正压回流，引发安全阀频繁动作或贮罐超压^[3]。而当压力调节失灵或联锁失效时，罐体甚至可能发生液体喷溅或低温泄放事故。

部分老旧装置存在信号反馈滞后、联动逻辑不清的问题，导致关键状态变化无法在第一时间传递至中控系统，从而错过干预窗口。例如氧氮比失调未被及时识别，可能在产出端造成产品气偏差，最终影响下游使用安全。

为应对这一系统复杂性带来的安全挑战，需从控制逻辑出发，设计多层级的保护链路，在关键节点设置软硬件双重冗余，并完善事故模拟演练体系，确保操控人员在极端情况下具备正确响应能力。

2 典型隐患类型与事故诱因分析

2.1 压缩机系统故障隐患与油气交叉风险

空分系统中的空压机作为高负荷运转设备，极易因润滑油系统故障、轴封失效或超温运行引发火灾或爆炸事故。部分老旧装置仍使用油润滑系统，其在高温高压条件下若与压缩空气混合，极可能形成可燃爆气团。当气体流速变化或流向倒置时，油气混合物易在排气末端形成滞留区，遇火源即引发猛烈燃烧。

此外，长期运行过程中，压缩机润滑油老化析出杂质，若未及时更换滤芯或清理油气分离器，将导致杂质随油气进入后续系统，在冷箱、膨胀机等精密设备中沉积，破坏换热效率甚至堵塞管路，进而引发低温失控。

事故分析显示，多起压缩机起火事件源于润滑油渗漏及机体内高温积碳未被识别，说明对压缩段运行状态的连续监测与预警机制亟需加强，特别应强化轴封完整性巡检、振动与温升异常报警制度建设。

2.2 冷箱内漏与空气成分紊乱的隐性风险

冷箱作为空分装置中最为核心的结构，内部管路与换热器极度密集，且环境封闭，一旦发生泄漏事故，极难从外部识别。部分事故案例中，因内管疲劳断裂或换热板腐蚀穿孔，导致低温气体混流，使产品纯度严重下降并引发用气端设备误动作，甚至造成化工联动系统失

控^[4]。

更为隐蔽的是，冷箱管路在检修过程中存在焊接质量不达标或焊后未进行足够时间冷凝干燥处理的情况，导致系统投运后内部水分结冰，破坏流道截面，引发局部压降与换热不均。极端情况下，液氧与液氮流速不匹配将使系统出现反流，造成吸附塔过压或外排氧浓度超标，构成严重环境与人员安全威胁。

冷箱作为高难度维护区域，亟需在运行中借助声发射、红外扫描等非破坏性检测手段建立“早识别—快反应”机制，同时加强焊缝与密封部位的制造与验收质量控制。

2.3 控制系统失效导致事故链升级

随着自动化水平提升，空分系统对控制系统的依赖程度日益加深，一旦 PLC 程序异常、数据采集失真或执行单元延迟响应，极可能导致错误指令扩散至全系统^[5]。例如，某企业在切换备用膨胀机时因控制程序逻辑冲突导致主机未能顺利卸载，导致回路超压，最终冷箱结构失稳。

另一类典型问题为传感器漂移或误报，造成系统对状态判断失准。如压力传感器故障导致“假高压”信号触发紧急泄压程序，导致罐体失压而迫停，打断产气连续性，造成全厂级别联锁停产。

应加强控制系统的防呆设计和联锁保护逻辑测试，建立从参数采集到执行反馈的全链路仿真验证流程，并定期开展控制系统稳定性评估。尤其应对历史故障数据进行系统复盘，构建“风险数据库”用于算法优化与事故预测模型训练，提升系统自主识别与预判能力。

2.4 操作人员违规行为引发的系统性风险

在空分装置运行中，人员操作失误仍是事故诱发的重要环节之一，部分基层单位存在操作流程不清、岗位职责交叉、交接班不规范等问题。例如，调节阀手动切换未同步上报中控系统，导致氧气浓度突然波动，引发用气设备联锁报警；又如，检修结束后阀门未恢复至原位，启动时未查验回路完整，形成误供气路径，造成严重物料浪费与事故隐患。

操作违章的根源在于岗位技能培训滞后、制度执行力不足。一些企业虽建立了操作规程，但缺乏标准化培训平台，尤其对新员工或临时外包作业人员的安全意识

教育不到位，实际作业中易出现“以经验代流程”“以惯例替标准”的问题，严重削弱安全边界。

2.5 检维修管理失控导致装置隐患积累

空分系统中冷箱、压缩机、低温阀门等设备维修复杂度高，且往往在高压、低温、高速等特殊状态下运行，检维修不当极易造成次生隐患。部分事故案例表明，因未执行断电断源、气体置换等标准步骤，检修作业过程中设备突然启动或残余氧气爆燃，造成人员伤亡与设备毁损。

建议推广数字化维修管理平台，建立维修作业标准工序模板，结合RFID与设备运行大数据对维保周期进行动态校准。在制度层面，应强化维保责任制与问责机制，实施维保过程的全流程可追溯管理，防止“挂名维保”“非标操作”等现象对系统安全形成慢性侵蚀。

3 多维度安全管理策略实施路径

针对空分装置运行过程中暴露出的多类型安全隐患及其复杂诱因，有效的管理路径不应仅限于单点补救或被动应对，而应通过制度建设、技术升级、人员管理和智能手段协同构建系统化防护体系，提升整体安全韧性。以下从四个方面展开实践路径探讨。

3.1 强化全生命周期制度保障体系

安全运行的前提在于制度基础牢固而落地。当前多数化工企业虽设有安全规章，但普遍存在覆盖不足、执行力弱、责任边界模糊等问题。为提升制度的刚性约束力，需围绕“事前预防—事中控制—事后总结”三个阶段，搭建标准化制度矩阵。

一方面，应明确岗位职责与操作权限边界，形成以岗位为单元的风险清单与操作流程图，并在年度审核基础上进行持续更新；另一方面，应推动制度嵌入信息系统，实现流程与系统的双重约束。尤其在特殊作业管理、检修管理、危化品存储与运输管理等方面，需制定分级响应预案与审批路径，防止因人为简化流程而导致安全空档。

对重大风险作业如液氧增压系统启动、冷箱除霜等，应设立专项风险评估流程，实施双人复核与多级授权，确保制度不仅存在于文本，更体现在操作流程每一细节。

3.2 推进自动化与联锁系统多级冗余设计

技术手段是提升运行可靠性的重要支撑。对于空分

装置而言，自动化水平高低直接决定运行安全性。需在现有控制系统基础上，优化信号冗余设计与联锁逻辑，防止因单点故障引发连锁事故。

应优先升级核心控制节点的PLC系统与分布式控制系统（DCS），构建关键参数异常自动切断功能。例如，设定氧气纯度低于临界值后自动减载、压缩机油温过高自动停机，并通过软硬件双保险联锁避免人为干预。

强化边缘设备的智能传感器部署密度，提高数据实时性与可靠性。对于高风险节点如低温换热器、液氧储罐、冷却水塔等，应采用多点监测融合判断方式，提升异常识别的灵敏度和响应速度。

3.3 构建“人-机-环”一体的培训与考核体系

人的行为是决定风险走向的关键变量。强化作业人员的安全意识与技能水平，需超越传统以讲座、视频为主的培训方式，构建融知识、行为、心理于一体的培训评价机制。

应对操作人员开展场景化培训，如模拟故障判断、误操作后的应对策略、应急流程协同等，通过情境任务训练提升实战能力。对中控操作人员，可引入动态决策模型训练工具，强化复杂信息下的判断逻辑训练，减少应急时刻的迟疑与误判。

在考核机制上，应实行“理论—实操—现场行为”三维量化指标评价，避免片面依赖纸面成绩。同时，对新入职、跨岗调动、技能升级等关键环节设置培训前置机制，建立人员技能档案与动态更新记录，确保操作能力与岗位风险匹配。

3.4 建立基于数据驱动的智慧监测与预警系统

面对设备运行实时状态与操作行为数据的不断积累，推动安全管理向“数据驱动决策”模式转变已具备现实基础。企业应构建覆盖主装置与关键子系统的智慧感知体系，将振动、压力、流量、温度、气体浓度等核心数据进行云端整合。

在平台层面，建议构建“空分装置运行安全数据中台”，打通各类系统数据壁垒，实现状态监测、异常诊断、趋势预测与决策辅助四位一体。同时结合机器学习算法，对事故先兆模式进行建模识别，如频繁小幅波动、非典型报警组合等，形成“事前预警—事中干预—事后回溯”的完整链条。

在数据可视化方面,应建立指挥中心数字孪生模型,以 3D 动态视图呈现装置运行状态、作业人员分布、应急通道畅通程度等内容,便于决策层精准把控局势与部署资源。

4 结语

空分装置作为化工企业中的核心连续性运行单元,其安全运行水平不仅直接影响企业产能与效益,更关系到人员生命安全与环境风险控制。从运行特性出发,本研究识别了其在高压、高温、低温工况下的多源隐患,剖析了当前管理实践中制度执行力不足、自动化水平参差、人员素养波动性大等核心问题。

围绕问题成因,论文提出了多维管理路径,包括制度与技术协同防护、联锁系统冗余升级、人员培训智能化推进及智慧监测系统构建,强调应以系统化、流程化、数据化思维重新构建空分装置安全管理体系,打破传统以经验主导的管理范式。

随着化工企业朝着绿色化、智能化、高效化方向迈

进,空分装置的安全管理也应与之匹配升级。未来实践中,需进一步推动“本质安全+过程管控+智能手段”的三维融合路径,实现从单点防范向整体韧性提升转型。唯有如此,企业方可在激烈的产业环境中保持持续稳定发展。

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]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.
- [3]郭震.煤化工空分装置运行问题和建议[J].中国设备工程,2023,(09):88-90.
- [4]徐竟博.关于空分装置在石油化工中的应用分析[J].化工管理,2019,(11):196-197.
- [5]王银彪.后备系统在煤化工企业大型空分装置群中的作用[J].神华科技,2018,16(04):64-66.