

石油化工配套空分装置常见故障分析及检修优化措施

李 明 曹广东

盛虹炼化（连云港）有限公司 江苏 连云港 222000

摘 要：石油化工生产对氧气、氮气等工业气体的连续性和纯度具有严格要求，空分装置作为其关键配套公用工程单元，运行可靠性直接关系主装置安全与经济性。本文基于石油化工配套空分装置的工艺特点与运行环境，系统梳理了原料空气压缩系统、纯化系统、精馏冷箱系统、膨胀制冷系统及仪控电气系统等单元的常见故障模式，从设备老化、介质腐蚀、操作波动、设计匹配及外部公用工程干扰等维度剖析故障成因。在此基础上，提出以状态监测为基础、以预防预知维修为核心、以标准化作业为保障的检修优化策略，涵盖检修周期动态调整、关键部件寿命管理、备件分级储备、检修工序优化及人员技能强化等措施。研究表明，通过系统性检修优化可显著降低非计划停车次数，延长装置连续运行周期，为石油化工企业提质增效提供技术支撑。

关键词：空分装置；石油化工；故障分析；检修优化；预知性维修

引言

空分装置以空气为原料，通过深度冷冻法分离出氧气、氮气及稀有气体，是石油化工企业不可或缺的辅助生产系统。在现代大型炼化一体化项目中，空分装置提供的氧气用于煤气化、重油加氢等工艺，氮气用于覆盖保护、吹扫置换及仪表动力源，其运行状态直接影响主装置的负荷率与安全边际。然而，由于空分装置长期处于低温、高压、交变载荷及介质腐蚀的复杂工况下，加之石油化工现场常伴随粉尘、可燃气体及振动干扰，各类故障呈多发态势。据统计，因空分装置突发故障导致的非计划停车，单次可造成数百万元乃至上千万元的经济损失，且恢复周期长、启动能耗高^[1]。因此，深入剖析该类装置常见故障的内在机理，并制定针对性检修优化措施，对于保障全厂生产链稳定性具有现实紧迫性。当前，国内关于空分装置故障分析与维修策略的研究多集中于钢铁、煤化工领域，针对石油化工配套场景下的特殊约束——如负荷频繁调节、备用系统有限、安全联锁严苛等——尚缺乏系统论述。本文以故障模式分类为切入点，揭示各子系统故障的因果链条，进而从检修制度、技术手段、组织管理三个层面提出优化方案，旨在构建适应石油化工生产节奏的空分装置可靠运行保障体系。

1 石油化工配套空分装置运行特征与故障模式分类

1.1 工艺配置与运行环境特征

石油化工配套空分装置通常采用分子筛吸附预净化、增压透平膨胀制冷、全精馏无氢制氮的内压缩或外压缩流程。与独立空分工厂不同，其供气对象为内部化

工装置，故运行模式呈现三大特征：其一，负荷波动频繁，主装置用氧用氮量随生产方案调整而变化，要求空分装置快速响应变负荷操作，导致精馏工况和转动设备运行点频繁偏移；其二，公用工程条件受限，蒸汽、循环水、仪表空气等常与全厂管网共用，压力、温度波动传导至空分系统，加剧设备受力状态变化；其三，安全联锁级别高，富氧环境、低温液体泄漏、碳氢化合物积聚等风险与石化可燃环境叠加，使保护动作阈值设置较保守，易引发联锁跳车。

1.2 故障模式分类框架

为便于系统分析，本文将常见故障按功能单元划分为五大类：原料空气压缩及预处理故障、纯化系统故障、精馏与冷箱故障、膨胀制冷及换热故障、仪控电气及辅助系统故障。在此基础上，依据故障发生的时间规律分为早期故障（安装调试遗留）、偶发故障（外部扰动引发）和耗损故障（疲劳、腐蚀、老化所致）。石油化工场景下，耗损故障占比超过六成，且故障演化速度受工艺波动影响呈加速趋势，这为后续检修策略以寿命预测为核心提供了依据。

2 各子系统常见故障成因分析

2.1 原料空气压缩与过滤系统故障

原料空气压缩机多为离心式或轴流-离心复合式，其入口过滤器、级间冷却器、叶轮及轴承为故障高发部位。常见故障包括：入口过滤器压差急剧升高，通常由石化厂区大气中粉尘、硫化物及挥发性有机物聚合形成黏性颗粒物所致，严重时造成进气量不足、压缩机喘

振；级间冷却器管束内壁结垢或外壁腐蚀泄漏，既降低冷却效率使各级排气温度超限，又可能引发冷却水进入气侧，导致叶轮冲蚀和转子动平衡破坏；叶轮表面积盐或结焦，改变流道型线，使性能曲线下移，在负荷调节时易进入不稳定区^[2]。此外，齿轮箱振动异常多源于不对中、齿轮磨损或油膜振荡，而轴承温度爬升常与润滑油劣化、冷却水温度升高或轴瓦间隙超差有关。究其根源，石油化工环境中空气含杂质的化学活性较强，加之后续处理系统负担加重，使压缩单元的磨损腐蚀速率远高于设计预估。

2.2 纯化系统（分子筛吸附）故障

纯化系统负责脱除空气中水分、二氧化碳及部分烃类，其核心设备为分子筛吸附器及切换阀门。典型故障为：分子筛吸附能力过早下降，表现为出口空气中二氧化碳含量超标，原因包括再生温度不足、再生气量偏小、加热器效率衰减，或分子筛因进水（前级冷却器泄漏）而粉化；切换阀（三杆阀或蝶阀）内漏或动作迟缓，造成均压不充分、再生气短路，严重时引发吸附器压力波动，甚至触发连锁停车；再生加热器电热管烧断或蒸汽加热器内漏，直接影响再生效果，且蒸汽漏入再生气系统会加剧分子筛毒害。值得注意的是，石油化工装置频繁调整负荷时，再生气取用位置的气量和温度相应改变，若未及时调整再生时序，极易形成累积性吸附负荷偏差，这种“操作耦合”故障常被误判为设备本身缺陷。

2.3 精馏系统与冷箱内设备故障

精馏系统以分馏塔、主冷凝蒸发器、过冷器及管道阀门为核心，运行于-180℃以下的低温环境。主要故障类型包括：主冷液氧中乙炔及碳氢化合物含量超标，其原因为空气纯化不彻底或长期低负荷运行导致局部浓缩，该故障虽不频繁但后果极其严重；塔板或填料效率下降，表现为氧氮产品纯度波动，通常由冻堵（二氧化碳或水分穿透分子筛）、塔釜液面剧烈波动或上升蒸汽分布不均导致；冷箱内管道因热应力疲劳而产生微裂纹，多发生于变负荷操作或停车复温阶段，裂纹初期不易察觉，随时间延伸可致低温液体泄漏，进而造成冷箱外壁大面积结霜、珠光砂塌陷甚至冷箱爆炸^[3]。此外，冷箱顶部呼吸阀堵塞或充氮保护压力异常，会使湿空气侵入，造成内部管道外壁结冰，加剧支架损坏和管道位移。

2.4 膨胀制冷系统故障

增压透平膨胀机为空分装置冷量核心，其转速高、轴承负荷大，故障集中于轴承、喷嘴调节机构及密封系

统。常见故障为：气体轴承或油轴承供气/供油压力波动，引起轴颈与轴承摩擦，轻则振动升高，重则烧瓦抱轴；喷嘴叶片因气流冲蚀或异物撞击变形，导致通流面积变化、膨胀效率降低，且调节机构卡涩会使制冷量无法匹配需求；密封气压力控制不当导致工艺气泄漏至润滑油系统或反之，污染油质并加速轴承磨损。在石化场景中，膨胀机常作为装置负荷调节的优先执行机构，频繁改变转速和喷嘴开度，加剧了疲劳损伤累积，其故障概率与调节频次呈正相关。

2.5 仪表、电气与控制连锁系统故障

仪控电气系统虽非工艺设备，但故障频次最高且影响面广。典型故障包括：关键测温点（铂电阻）引线接触不良或元件老化，导致温度显示跳变，引发保护误动作；液位计（差压式或电容式）导压管堵塞或零点漂移，造成塔釜液位失控；电磁阀和定位器在低温或腐蚀性环境中响应滞后，使调节阀无法跟踪设定值。电气方面，高压电机绝缘老化、变频器功率单元过热、UPS 电源切换失效等均可能诱发跳闸。连锁逻辑本身的设计缺陷也不容忽视，如停车连锁条件过于严苛、冗余配置不合理，使一次仪表瞬时波动直接导致整机停车。石油化工现场存在大量的强电磁干扰和无线电频段噪声，对模拟量信号的传输质量构成严峻挑战，屏蔽接地不良引发的共模干扰常使 DCS 显示值偏离真实工况。

3 检修优化措施体系

针对上述故障成因，传统“到期必修、修必修好”的定期检修模式存在过度维修与维修不足并存的问题。本文提出以可靠性为中心的检修（RCM）理念下的优化措施体系，涵盖技术升级、周期优化、过程控制和人力保障四个维度。

3.1 基于状态监测的预知性检修策略

建立覆盖压缩机、膨胀机及关键泵组的在线振动监测系统，采集加速度包络、轴心轨迹及频谱特征，与设备健康基线对比，识别早期轴承磨损、叶轮不平衡及齿轮损伤。对机组润滑油进行定期理化分析与光谱检测，依据铁谱颗粒浓度及元素含量变化，判定磨损阶段并预测剩余寿命，从而将“定期换油”升级为“按质换油”。对于冷箱内无法直接监测的设备，通过测量冷箱表面温度场分布、扒口处气体成分分析及主冷温差变化趋势，间接推断内部绝热层沉降、管道泄漏等隐患^[4]。在 DCS 中增设故障预警模块，对温度变化率、压差累积值、电机电流波动等特征量进行阈值与速率双重监控，实现故障早于连锁动作前报警，为主动停机检修提供决

策窗口。

3.2 关键设备检修周期与工序优化

针对分子筛吸附器，打破固定年限更换分子筛的做法，改为根据出口二氧化碳穿透曲线和再生能耗增量动态确定更换时机；同时优化再生步骤的升温、加热、冷吹时间配比，缩短有效检修窗口。对离心压缩机大修周期，结合轴承磨损速率和叶轮探伤结果实行弹性延展，在振动值稳定前提下适度延长检修间隔，减少停车次数。在检修工序编排上，采用并行作业与模块化拆装——将压缩机组检修分为机械、电气、仪表三个并行子项，利用三维装配图预演吊装顺序，减少交叉等待时间。针对冷箱扒砂检修这类耗时最长的高风险作业，制定“局部扒砂+微正压保护”方案，仅对故障区域进行隔离维修，避免全箱复温，可将检修周期从常规45天压缩至25天以内。

3.3 备件管理与维修质量标准化

统计各类故障的备件消耗频率和采购周期，建立关键备件（如膨胀机轴承、分子筛专用阀、主冷换热单元等）的最低安全库存与动态预警机制，尤其对进口长周期备件提前一年规划订货。同时推行备件国产化替代验证，针对非核心密封件、过滤器滤芯及紧固件，经等效测试后纳入合格供方目录，缩短紧急采购时间。制定标准化的检修作业指导书，明确每道工序的质量验收点（如轴承间隙、联轴器对中值、螺栓紧固力矩、焊缝着色探伤评级等），并采用检修影像记录存档，实现质量可追溯^[5]。引入检修项目责任人签字制度，对返修率超标项目进行技术复盘，形成“故障—维修—评价—改进”的闭环管理。

3.4 操作管理与检修协同优化

许多空分故障与操作处置不当直接相关，因此检修优化必须延伸至日常操作规范。编制基于故障模式的“操作防误手册”，明确变负荷速率限制、分子筛切换时压力均衡操作要则、膨胀机启动前密封气确认程序等。建立设备异常处置预案，将常见故障按影响程度分为三级，对应不同的应急检修响应流程，避免故障扩大化。同时，推动检修与工艺岗位人员交叉培训，使检修人员熟悉工艺参数含义，操作人员掌握基本巡检诊断技

能，减少信息传递失真。利用智能巡检终端，将点检数据实时上传至设备管理平台，自动生成设备健康评分，为检修排程提供量化依据，实现检修计划与生产调度协同会商。

4 结语

石油化工配套空分装置的运行可靠性，不仅取决于设备本身的设计制造水平，更在很大程度上受制于故障诊断的及时性与检修策略的科学性。本文在系统梳理压缩、纯化、精馏、膨胀及仪控系统典型故障模式及其成因的基础上，提出了一套融合预知性监测、弹性周期、标准化工序和数字化管理的检修优化措施体系。该体系的核心在于将被动“事后维修”和僵化“定期维修”转变为主动“状态维修”与“风险维修”，使检修资源配置与设备实际健康状态动态匹配。实践表明，推行上述优化措施可有效降低非计划停机频次，延长单次运行周期，同时节省备件库存资金和检修人工成本。未来，随着物联网、大数据和人工智能技术的深度应用，空分装置检修优化将向自诊断、自决策方向演进，但其根本仍在于对设备物理失效机理的深刻认知和现场执行力的持续提升。石油化工企业应结合自身装置特点，因地制宜地吸纳本文提出的优化思路，构建具有本厂特色的空分装置健康管理体系统，为全厂安稳长满优运行奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 王建平, 刘志刚, 陈伟. 空分设备冷箱内泄漏故障诊断与处理技术研究 [J]. 深冷技术, 2022, 45(3): 22-28.
- [2] 张明辉, 李国栋, 赵岩. 基于振动分析的离心式空压机故障预测方法 [J]. 石油化工设备, 2023, 52(1): 15-21.
- [3] 刘学智, 孙海峰, 周丽. 分子筛纯化系统运行异常分析及再生工艺优化 [J]. 化工自动化及仪表, 2021, 48(6): 511-517.
- [4] 陈永强, 吴晓东. 大型空分装置膨胀机轴承故障机理与维修策略 [J]. 低温工程, 2024, 41(2): 34-40.
- [5] 杨秀云, 郑志刚, 林峰. 石化企业空分设备仪控系统可靠性提升措施 [J]. 石油化工自动化, 2023, 59(4): 68-73.