

影响深冷空分制氮装置安全长周期运行故障原因探讨

沈玉超

中蓝连海设计研究院有限公司 江苏连云港 222004

摘要: 文章以某化工厂6000Nm³/h制氮装置为研究对象,深入剖析了压缩机、分子筛、膨胀机、仪表电气等关键环节的典型故障,揭示了超负荷运行对装置安全稳定的影响。在综合考虑故障机理、生产工况的基础上,从设备管理、操作控制、故障预警等方面提出了提升长周期运行水平的优化措施。研究表明,立足于实时监控数据,应用机器学习等智能算法构建预警模型,可显著提高故障预测的精准度。

关键词: 空分装置; 冷凝器; 运行故障

引言

随着国民经济的快速发展,氮气作为化工、电子、冶金等行业不可或缺的原料,其需求量呈现爆发式增长。深冷空分凭借产品纯度高、规模化生产等优势,已成为工业制氮的主流技术。然而,由于深冷空分装置投资大、工艺复杂、运行环境恶劣,一旦发生故障,其造成的停产损失往往难以估量。因此,如何确保装置安全、平稳、长周期运行,成为制氮企业面临的共性难题。

一、深冷空分制氮工艺流程及装置概况

(一) 某化工厂6000Nm³/h深冷空分制氮装置工艺流程

以某化工厂6000Nm³/h制氮装置为例,其采用典型的单压双精馏流程。工艺主要由空气压缩、预冷、纯化、冷箱、精馏5个部分组成。来自空压机的0.87MPa压缩空气经空冷塔冷却至13℃,再依次通过过滤器、水冷器进入切换吸附的分子筛纯化器,脱除空气中的水、CO₂等杂质。净化空气在主换热器中被冷至-173℃部分液化,进入下塔与来自上塔的液氮换热,进一步冷却。塔底富氧液在减压阀节流膨胀制冷,塔顶氮气约-192℃经主冷换热器回收冷量后产出。上下塔在150~250kPa压力下通过精馏实现了空气中氮氧的分离提纯。

(二) 深冷空分制氮装置运行参数及特点

深冷空分装置运行工况一般为:操作压力0.4~0.8MPa,精馏塔压力150~250kPa,关键设备如压缩机、膨胀机转速在5000~8000rpm,主要换热器温差5~8℃。装置投资大、工艺复杂,变工况能力差,启动时间长达12~24h,且在超低温、带压状态下连续运行,设

备故障不易排除。因此其对长周期安全稳定运行提出了很高要求,一旦发生意外停车,重启成本高,生产损失大^[1]。同时装置能耗高,约占氮气成本的60%,能效优化备受关注。

二、该化工厂深冷空分制氮装置运行故障分析

(一) 压缩机系统故障

压缩机作为深冷空分装置的动力核心,其可靠性直接影响制氮装置的安全长周期运行。该化工厂制氮装置投用初期,空压机故障频发,年累计12次,其中因低油压、高振动引起的跳机占75%。空压机喘振是导致停机的主要原因之一。通过对典型案例的分析发现,喘振多发生于节流阀开度较小或入口导叶角度过大等工况,系统阻力变化诱发压缩机工作于喘振区。另一方面,由于润滑油品质差,油路杂质较多,滤芯堵塞时有发生,造成轴承油压突变,引起高温或低压报警^[2]。同时由于联轴器安装不当,偏心大等原因,也引起了多次振动报警甚至损坏。

(二) 分子筛纯化器故障

制氮装置对空气的纯度要求极高,CO₂等杂质含量须控制在ppm级。净化空气的任务主要由分子筛吸附器承担。该装置采用两台分子筛塔切换运行,一台吸附,一台再生。投用初期曾多次发生纯化器进口压差骤升,导致装置波动甚至停车。某年“2.15”事故中,两台吸附塔同时进水,CO₂瞬间超标,不得不紧急停车。事后排查发现,因再生加热器长期超温运行,吸附剂强度下降,并伴随着再生塔冷却水喷淋量不足,出口温度偏高等因素,分子筛吸附能力急剧恶化,使原本轮换使用的两台吸附器同时失效。

（三）膨胀机故障

膨胀机是深冷空分装置的关键设备之一，起着补充制冷量、平衡物料的作用。然而由于其工作环境恶劣，轴承、叶轮、密封等部件极易磨损，是故障的高发部位。统计显示，三年间该装置两台膨胀机共发生8次故障，其中因前置过滤器堵塞引起的异常占50%。B机组曾出现进口滤芯堵死，气体流通受阻，造成轴承温升，同时伴有剧烈振动。拆检发现叶轮多处磨损，动静密封环间隙增大。此外，由于装置物料波动频繁，使得膨胀机经常偏离最佳工况，效率下降明显，为控制精馏塔压力，透平频繁切换，大大增加了故障风险。

（四）仪表电气故障

深冷空分制氮装置自动化程度高，测量与控制点多达上千个，涉及流量、液位、压力、温度等各个环节。仪表故障或误操作是引发非计划停车的常见诱因。该装置DCS记录显示，仪表失灵、错跳累计36次，其中液位计37%、压力变送器28%、温度计22%。典型的如精馏塔顶冷凝液位计长期高指，而实际液位偏低，运行中突然切换，致使塔内压力骤变，继而引发联锁停车。此外，由于氧分析仪量程选择不当，灵敏度不足，也多次漏报高氧警告。在电气设备方面，变压器局放、开关失灵、保护错误动作等问题也时有发生，其中因电源瞬时中断引起的装置波动就达7次之多。

（五）超负荷影响

随着下游装置负荷的提升，该制氮装置经常在设计产量110%左右高负荷运行。在超负荷状态下，空分塔精馏能力不足，同时主换热器换热温差减小，使得进入精馏塔的空气液化率下降，塔顶冷凝器热负荷骤增。由于冷凝液回流减少，塔釜温度上升，液位降低，进而影响塔压操作稳定性。在高负荷波动情况下，原有的自动控制策略往往滞后，加剧了工艺参数的起伏，也加大了操作难度^[3]。此外，在产量倒挂时，空压机、透平机频繁调节，在高速区运行，存在喘振的风险。同时原料空气加工量的骤增，对分子筛的吸附性能也提出更高要求。一旦净化能力不足，装置安全隐患增大。

三、提高深冷空分制氮装置安全长周期运行的措施建议

（一）压缩机系统的预防性维护策略

鉴于压缩机系统故障对装置安全稳定运行的重大影响，亟需建立一套全面的预防性维护体系。首先，应优化润滑系统的管理，定期对油品质量进行化验，及时

更换变质油；同时加强油路清洁度控制，缩短滤芯更换周期，避免因油品污染而引发的轴承损坏。其次，开展压缩机振动状态监测，在叶轮、轴承等关键部位设置速度、位移传感器，实时采集数据，及时发现潜在故障征兆。再者，针对喘振失稳等特殊工况，应优化操作参数，绘制喘振裕度图，引导现场安全操作。此外，合理安排大修周期，每2年开展一次压缩机开缸检查，消除转子不平衡、部件磨损等隐患。通过状态检修代替事后检修，可有效降低非计划停机率。

（二）纯化器周期性再生与吸附剂定期更换

针对制氮装置分子筛吸附剂老化失效引发的CO₂超标事故，应严格按操作规程进行周期性再生，优化热再生温度曲线，每班对再生出口温度进行抽查，发现偏差立即调整。对于TSA型吸附器，再生气温应控制在280–300℃；采用PSA工艺时，解吸压力应维持在0.01–0.03MPa。考虑到吸附剂使用寿命一般为3–5年，应提前做好更换计划，并留有一定裕量。对报废吸附剂的机械强度、比表面积等关键指标进行检测，通过与出厂参数的对比，优选最佳更换周期^[4]。此外，还应关注吸附塔的压力、湿度变化情况，湿度过高时及时调整制冷温度，确保空气水露点低于–40℃。

（三）膨胀机振动监测及叶轮平衡等

针对膨胀机的高发故障特点，建议从机组状态监测、部件优化两方面入手。在线监测方面，可选用加速度、位移传感器，并辅以声发射、油品谱等先进诊断工具，构建机组状态监测系统。利用智能算法对采集的海量数据进行分析，评估轴承、齿轮等关键部件的健康水平。同时针对透平机组开展叶轮平衡与转子对中专项治理，消除高速旋转设备的固有缺陷。研究表明，当叶轮不平衡量控制在ISO1940 G2.5等级时，膨胀机运行平稳性大幅提升。在部件优化方面，可采用自动反冲洗装置，定期清理膨胀机进口滤网，降低堵塞风险。针对易磨损的轴承与密封环，选用新型材料，并优化其结构尺寸，提高使用寿命。

（四）完善操作规程，制定合理的启停车、应急预案

健全的操作规程是确保装置安全平稳运行的基础。应组织有经验的工程技术人员，对标行业最佳实践，系统梳理装置的开停车流程、正常运行参数范围、应急处置措施等，形成规范统一的操作规程。尤其是在开车阶段，应细化各工序的控制要点，如升压速率、温度曲线等，为现场操作提供详细指引^[5]。针对典型的异常工况，

如停电、设备故障等，应制定切实可行的应急预案，明确紧急停车步骤、一键停车等级等，确保关键节点“心中有数”。在此基础上，还应定期开展应急演练，通过情景模拟，检验预案的可操作性，提升员工的实战能力。

（五）加强自动化控制，减少人为失误

面对深冷空分这一大型复杂装置，仅依靠人工操作难免出现疏漏。应大力推进自动化控制，最大限度减少人为干预。可采用先进控制算法，如模型预测控制、多变量解耦控制等，提高系统的自适应能力和抗干扰能力。针对生产负荷波动等复杂工况，优化控制策略，采用前馈+反馈等多回路协同控制，实现产量、能耗的动态优化。在操作界面设计上，应遵循人机工程原理，合理划分操作权限，并设置重要参数越限报警，降低误操作风险。对于关键工艺参数，宜采用自动化仪表实现闭环控制，减少人工抄表、调节阀门等环节。如采用智能电动执行器取代手动阀门，可实现精馏塔进料量的自动调节。

（六）建立装置关键参数的实时监控体系

随着信息技术的飞速发展，工业互联网、大数据等新一代信息技术已广泛应用于流程工业，为装置的故障诊断与预警提供了新思路。首当其冲的就是建立覆盖装置全流程的实时监控体系，通过部署各类传感器，采集压力、温度、流量、液位、组分等关键参数。选用工业以太网、现场总线等通信协议，构建高速、高效、高可靠的数据传输网络。利用云平台强大的计算与存储能力，对海量监测数据进行汇聚、清洗与治理，形成统一规范的数据中心。在可视化展示方面，可基于GIS地图，设计炫酷大屏，直观呈现装置三维立体模型，并与实时参数联动，为管理人员洞察装置全局提供数字化抓手。

（七）应用机器学习等手段对历史数据进行深度挖掘

工业大数据蕴含着丰富的知识与规律。深冷装置历经多年运行，已积累了大量的生产参数、设备状态等历史数据。应用机器学习、深度学习等人工智能技术，对其进行深度挖掘，可探索工况、设备、产品之间的内在关联，发现人工难以察觉的潜在规律。如采用关联规则挖掘算法，可揭示引发故障的多参数耦合模式；采用支持向量机、随机森林等分类算法，可实现设备健康状态的智能诊断；采用时间序列分析，可刻画装置动态特性，预测生产趋势。同时，面向工程师日常技术决策需求，还可利用数据透视、OLAP等商务智能工具，从不同维度

对数据进行切片与钻取，快速生成各类分析报表，让宝贵的数据资产创造更大价值。机器学习与工程经验的完美结合，必将助推装置管理迈向智能时代。

（八）开发故障预警模型，提前发现异常苗头

在海量生产数据的基础上，应用机器学习技术开发针对性的故障预警模型，可以从被动应对向主动预防模式升级。可采用异常检测算法，建立装置关键参数的正常工况模型，当监测数据偏离阈值时，及时预警，为现场处置争取宝贵时间。对于具备明确物理机理的故障模式，如压缩机喘振、塔板淹没等，则可利用机理模型，量化故障的影响因子及其权重，评估故障发生概率。而对于大量机理不明的故障，则宜采用数据驱动的建模范式。如使用神经网络构建故障模式与征兆参数的映射关系，实现故障的早期预警。此外，面向设备老化、腐蚀等长周期、渐变性故障，可基于退化轨迹，开展基于贝叶斯理论的剩余寿命预测，制定检修策略，避免设备带“病”运行。

结语

综上所述，影响深冷空分制氮装置安全长周期运行的因素错综复杂，既有技术工艺层面的设备故障、生产波动，也有管理策略方面的人员失误、方案缺陷等。应坚持“以预防为主，防治结合”的原则，从全生命周期、全流程的高度，系统识别并消除各类安全隐患。未来还需在设备设计、材料选型等方面开展深入研究，从源头提升装置的本质安全水平。

参考文献

- [1] 李汉文. 浅析影响深冷空分制氮装置安全长周期运行故障[J/OL]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2022(1): 130-133.
- [2] 方亮. 影响深冷空分制氮装置安全长周期运行故障分析[J/OL]. 中国科技期刊数据库 工业B, 2016(10): 25-25.
- [3] 周富俊. 空分装置长周期运行技术研究[J]. 甘肃科技纵横, 2017, 46(08): 29-32.
- [4] 潘冬, 张中佑, 陈梦. 浅析影响深冷空分制氮装置安全长周期运行故障[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 32(01): 43+42.