

大型深冷空分装置安全运行管理的实践与思考

党伟

国能榆林化工有限公司

DOI:10.32629/jsse.v4i3.20983

[摘要] 随着国内煤化工产业规模化发展,配套深冷空分装置呈现大型化、集群化、高压化特征,其安全稳定运行直接关系全厂生产命脉。本文基于长期空分装置运行管理实践,从全生命周期管理视角出发,系统阐述了维持大型空分装置长周期安全运行的关键要素。文章从设计本质安全、设备选型可靠性、施工质量控制、运行精细化调节、安全管理措施、人才团队建设六个维度展开论述,强调“预防为主、源头治理”的安全理念,提出设计阶段的风险前置防控、运行阶段的指标精准管控、管理层面的人才梯队建设等核心观点。空分装置的安全管理是一项系统工程,唯有将技术手段与管理创新深度融合,构建“人、机、料、法、环”协同运转的本质安全体系,实现空分装置安、稳、长、满、优运行,为煤化工产业发展筑牢安全根基。

[关键词] 大型深冷空分; 安全运行管理; 本质安全; 全生命周期; 风险防控

中图分类号: X820.4 **文献标识码:** A

Practice and Reflection on Safe Operation Management of Large-Scale Cryogenic Air Separation Units

Wei Dang

Chn Energy Yulin Chemical co.,LTD

[Abstract] With the large-scale development of the domestic coal chemical industry, the supporting cryogenic air separation units (ASU) are exhibiting trends toward larger scale, clustering, and higher pressure. Their safe and stable operation is directly critical to the entire plant's production. Based on long-term operational management practices for ASU, this paper systematically elaborates on the key factors for maintaining long-term, safe operation of large-scale ASU from the perspective of full lifecycle management. The discussion is structured around six dimensions: design intrinsic safety, equipment selection reliability, construction quality control, refined operational regulation, safety management measures, and talent team development. It emphasizes the safety philosophy of “prevention first, source control”. Core viewpoints are proposed, including proactive risk control at the design stage, precise index management during operation, and talent echelon construction at the management level. Safety management of ASU is a systematic engineering task. Only by deeply integrating technical measures with management innovation, and by building an intrinsic safety system featuring synergistic operation of “people, equipment, materials, methods, and environment”, can we achieve the safe, stable, long-term, high-load, and optimal operation of ASU, thereby laying a solid safety foundation for the development of the coal chemical industry.

[Key words] large-scale cryogenic air separation; safe operation management; inherent safety; full lifecycle; risk prevention and control

引言

随着国家能源战略的推进,一批重大煤化工项目相继落地,配套深冷空分装置规模持续攀升。当前,煤化工配套空分装置普遍具备以下特征:单套容量大(8万~10万Nm³/h等级空分装置已成常态)、产品压力高(氧气压力6~10MPa)、压力等级多样、工

况环境复杂。由于空分装置处于煤化工生产流程的前端,一旦发生事故导致停车,将引发下游全系统连锁停产,损失巨大。从行业安全形势看,空分装置爆炸、砂爆、液氧泄漏等事故时有发生,所以本文围绕如何实现装置长周期安全稳定运行这一核心命题,从设计本质安全、设备选型、施工质量、运行调节、安全管理、

团队建设等方面进行系统探讨, 以期为行业同类型装置的安全管理提供借鉴。

1 设计本质安全

本质安全是指通过设计手段使生产系统本身具有安全性, 即使在误操作或发生故障的情况下, 也不会导致事故发生或能将事故后果降至最低。设计阶段是塑造装置安全基因的关键窗口, 一旦留下先天缺陷, 后期运行中很难根本性消除隐患。

1.1 流程组织设计

工艺流程的选择是空分装置安全运行的基础, 设计阶段应以安全稳定运行为主线, 统筹兼顾能耗指标与经济性。

(1) 优先选择安全可靠的工艺流程, 对于煤化工大型空分装置, 推荐采用分子筛前端净化、增压透平膨胀机制冷、液氧内压缩流程。内压缩流程通过液氧泵大量抽取液氧, 使主冷内液氧强制循环流动, 有效破坏碳氢化合物的积聚条件, 从根本上降低主冷燃爆风险, 同时, 采用全浸式主冷操作模式, 以及铜填料, 杜绝“干蒸发”导致的乙炔等危险物质析出及析出产生的危害, 合理配置前端净化系统, 原料空气的洁净程度直接决定后续系统的安全水平, 应采用高效自洁式空气过滤器与分子筛纯化系统组合, 分子筛吸附器宜采用立式径向流双层床或三层床设计, 强化对水分、二氧化碳、乙炔及其他碳氢化合物的吸附清除能力, 针对煤化工区氧化亚氮(N_2O)含量较高的特点, 可考虑增设专用吸附剂床层^[1]。

(2) 冷箱内管道设计应考虑充分的热应力补偿, 合理设置固定支架、活动支架和限位支架, 确保低温工况下管道位移正常, 避免拉裂泄漏。主冷板式单元设计时翅片间距宜适当加大, 防止运行中碳氢化合物结晶堵塞流道。

(3) 上塔、下塔、主冷等关键设备对应冷箱部位应配置足够通量的多层次安全泄放设施, 确保事故状态下的泄压能力。冷箱保护气应使用氮气, 避免使用污氮气或空气可能带来的富氧风险。

1.2 选址与总图布置

空分装置的选址、布置直接关系吸入口空气的质量及事故影响范围。常规布置中, 空分装置应在有害气体及固体粉尘散发源的全年最小频率风向的下风侧。吸风口与乙炔站、碳氢化合物排放源等之间的安全距离应符合GB 16912—2008《深度冷冻法生产氧气及相关气体安全技术规程》的要求。在装置区内, 液氧储罐与控制室间距不小于30m; 装置周边应设置环形消防通道, 确保救援通行。

1.3 安全设施配置

(1) 监测报警方面。主冷液氧应配备总碳氢化合物(包括乙炔)、氧化亚氮在线分析仪, 实现连续监测。吸取“义马空分事故”, 冷箱内应多点设置压力、温度监测及气体成分取样分析点, 冷箱基础应设置温度监测, 泄漏时及时预警。

(2) 保护装置方面。氧气管线关键阀门应选用气动遥控方式, 大口径频繁操作阀门的手柄应引至防爆墙外。膨胀机等关键转动设备的密封气源应设置露点监控, 防止水分进入造成设备故障停车或损坏。

(3) 防雷、防静电。主冷箱防雷接地冲击电阻不应大于30 Ω , 主冷及液氧储罐防静电接地电阻不应大于10 Ω 。氧气管道上的法兰连接和螺纹连接处应采用铜导线跨接, 跨接电阻小于0.03 Ω ^[2]。

1.4 操作可靠性安全设计

设计阶段应充分考虑操作可靠性、容错性, 体现“失误—安全”和“故障—安全”原则, 关键操作阀门设置防止误动作措施; 重要联锁回路采用“三取二”或“二取二”冗余表决逻辑; DCS系统设置专用的过电压保护装置及UPS应急电源, 确保控制系统在任何工况下可靠工作; 空压机出口止回阀、进、出冷箱阀门、纯化系统阀门、氧气系统阀门等选择可靠、使用业绩好的品牌, 确保装置运行故障率低、稳定可靠。

1.5 与上下游系统的协同

空分装置不是孤立的生产单元, 其与上下游系统的协同设计至关重要, 设计阶段应充分考虑: 与上游循环水、蒸汽系统的匹配性, 确保汽驱动机组、预冷系统及分子筛再生蒸汽的稳定供应; 与下游气化等用户的产耗平衡; 与全厂SIS系统的集成, 空分装置停车时触发下游装置降负荷或安全停车程序, 防止联锁事故发生。

2 设备质量可靠、系统匹配性好

2.1 严控首台套使用风险

首台使用的空分核心设备, 应严谨评价其可靠性, 关键设备如空压机组、增压机组、高压板式换热器等应具有一年以上同规模装置运行业绩, 并有真实的运行状况记录、数据。

2.2 机组与分馏系统的匹配性

机组、分馏系统之间有恰当的匹配, 机组选型还应充分考虑地区大气条件、四季环境温度变化对吸气量和排气压力的影响, 避免因匹配不当导致机组偏离高效区运行或超负荷情况发生。

2.3 换热效率问题

主换热器热端温差是衡量装置换热效率和冷量回收水平的重要指标, 也是影响能耗和安全的关键参数。外压缩流程热端温差一般控制在3K左右, 内压缩流程4~7K。热端温差过大不仅意味着冷量损失增加、能耗上升, 还可能导致返流气体出冷箱温度偏低, 引发碳钢管道冷脆风险。设计阶段应合理选择换热面积、对应换热器台数、结构及布置形式等。运行中应监控温差变化趋势, 发现异常增大及时分析原因并调整。近两年出现的几套国产大型空分因换热器问题, 冷量损失严重(运行时热端温差接近11 $^{\circ}C$), 虽采取串联换热器、每个支路增设阀门调整偏流的改造方案, 但是属于补救性质的措施, 不能从根本上解决冷量损失严重问题。

2.4 关键阀门、仪表质量把控到位

阀门和仪表是影响系统稳定运行的重要因素。应优先选用有良好业绩的知名品牌产品, 建立规范的到货检验程序。对于分子筛切换阀、氧气调节阀等高频动作或安全关键位置的阀门, 其密封等级、材质等级应满足相应工况要求。许多项目试运行初期仪表成批次出现问题, 严重影响到空分装置的稳定运行, 应从采购源头和入库检验环节加强管控。

3 施工质量规范、试车顺序科学合理

3.1 严格按照规范施工

冷箱内铝合金管道焊接应采用高纯氩气保护的氩弧焊工艺,焊缝应100%射线探伤检验,质量评定应达到Ⅱ级及以上,并留存影像资料,管道支架必须严格按照图纸区分固定支架、活动支架、限位支架的功能要求进行施工,确保低温工况下管道热应力得到合理补偿,蒸汽管线、氧气管线等高温或特殊介质管道应格外重视施工质量。

3.2 把控施工质量关键环节

大型深冷空分装置对管道、阀门、换热器及塔器等内表面的清洁度要求极高。任何残留的焊渣、锈皮、灰尘、油污或水分,都可能在低温工况下堵塞节流元件、磨损高速运转的透平机械,甚至引发主冷碳氢化合物积聚而带来爆炸风险。因此,系统吹扫与清洁度保证是施工质量控制中承上启下的关键环节。投用前应进行彻底的吹扫和清洁度检查。尤其对于氧气管线系统,施工质量是安全质量管控的重点,管道在安装前首次脱脂处理,安装后焊缝质量除射线探伤外,还应按规定进行压力(强度)试验,随后整体打循环二次脱脂,合格后吹除干净封口保护,投用前应用无油干燥氮气或干燥空气进行吹扫,吹扫速度不应小于20m/s,并在吹扫口用靶板检验,合格后进行气密试验。任何残留的焊渣、铁锈、机械碎屑都可能在高速氧气流中成为引爆源^[3]。

3.3 填料、吸附剂装填规范

预冷系统填料、分子筛吸附剂的装填质量直接影响运行性能,装填过程中严格控制装填密度和均匀性。分子筛和活性氧化铝的装填高度、床层压差等参数应满足设计要求。对于使用超过十年以上的吸附剂,应定期取样分析性能,及时评估更换需求。

4 装置的稳定运行

4.1 减少开停车、避免非计划停工

频繁的开、停车是导致空分装置设备损伤和安全风险增加的重要因素,每次开停车过程中的温度交变会在低温换热设备等产生热应力累积,增加焊缝开裂、密封失效的风险。应通过精细化的设备维护、科学的设施管理和准确的故障预判,最大限度减少非停情形。

4.2 控制负荷变动、杜绝超负荷运行

空分装置虽具有一定的变负荷能力,但频繁大幅度的负荷调整会破坏精馏塔内的物料平衡和能量平衡,导致产品纯度波动、提取率下降。应通过上下游协同,尽量维持装置在固定负荷稳定运行,严禁超出设备设计能力的超负荷运行。

4.3 严禁违规操作和偏离指标运行

所有操作必须严格依据有效的操作规程、工艺卡片等技术文件执行,杜绝赶进度、省成本、凭经验等习惯性违章操作行为。当运行指标出现异常并接近或超出控制限值时,操作人员必须立即按预案处置,确保人身安全、设备稳定以及产品质量或生产流程受控。

4.4 环境温度变化的预见性调整

夏季高温环境、空气密度小,机组吸气量下降,同时循环水温升高,预冷系统稳降减弱,装置产能受限。冬季极寒天气下,

循环水系统、仪表管线、蒸汽疏水器等面临冻结风险。应针对不同季节特点,提前制定运行调整方案和防冻保温措施,确保系统平稳运行。

4.5 设备预见性维护

建立完整的设备管理体系,对设备实施全过程管理。建立设备技术档案(包括记录设备的设计参数、制造质量文件、安装记录、运行数据、检修记录、检验检测报告等信息)。对压力容器、压力管道、安全阀等法定检验设备,按时进行定期检验,确保合法合规使用。

5 安全管理

5.1 制度规程体系健全

建立覆盖所有岗位、所有作业活动的安全管理制度和操作规程体系。操作规程应详细规定正常操作、异常工况处置、紧急停车等各类场景下的操作步骤和 safety 注意事项。严格执行作业票证制度,对动火、进入受限空间、盲板抽堵等高风险作业实施审批管理和现场监护。

5.2 风险分级管控与隐患排查治理

按照安全管控规定,建立安全风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制。定期、不定期组织各专业人员开展安全检查和隐患排查,对排查出的隐患建立台账,按照“五定”原则进行闭环管理。对重大隐患应立即停止相关设备运行,在彻底治理前不得恢复生产。

5.3 应急管理体系

制定完善的应急预案体系,有针对性的编制专项应急预案。定期组织应急演练,检验预案的实用性和可操作性,提高员工的应急处置能力和自救互救技能。配备充足的应急物资和装备,确保突发事件时能够迅速有效处置。

6 结语

大型深冷空分装置的长周期安全稳定运行,是一项贯穿设计、制造、施工、运行、维护、管理全过程的系统工程。本质安全是根基,设备可靠是保障,运行精细是关键,人员素质是核心。随着空分技术的不断进步和数字孪生、智能诊断等新技术的深入应用,装置的本质安全水平和运行可靠性将进一步提升。但无论技术如何发展,人的因素始终是安全生产的决定性力量,时刻保持对安全的敬畏之心,脚踏实地做好每一项基础管理工作,才是空分装置安全稳定运行的关键。

[参考文献]

- [1]姜义涛.大型深冷空分装置提取氩气的分析[J].低温与特气,2023,41(1):9-10+50.
- [2]袁淑光,许锋.煤炭供电系统安全运行管理问题及对策[J].大众标准化,2026,(10):112-114.
- [3]冯金赢,岳卫琳,付显朝.探讨长输天然气管道安全运行管理措施[J].中国化工贸易,2026,18(6):130-132.

作者简介:

党伟(1983—),男,汉族,陕西延安人,学士学位,高级工程师,空分生产运行管理工作。