

石油化工空分装置的安全风险评估与防范措施

曹广东 李 明

盛虹炼化（连云港）有限公司 江苏 连云港 222000

摘 要：石油化工空分装置在运行过程中涉及低温、高压、富氧、窒息及可燃物积聚等多重危险因素，其安全风险具有隐蔽性、连锁性和后果严重性的显著特征。本文立足于石油化工配套空分装置全生命周期，从工艺物料危险特性、关键设备失效模式、操作环境特殊性以及外部干扰因素四个维度开展系统性的风险辨识。在此基础上，引入层次分析与风险矩阵相结合的半定量评估方法，构建适用于石化空分场景的风险分级评价框架，据此划分重大风险、较大风险、一般风险和低风险四个等级。针对各风险等级，从本质安全设计、主动保护层强化、被动防护设施完善及应急管理四个层面提出分层级防范措施体系，重点阐述主冷碳氢化合物监控、冷箱防爆泄压、富氧区域防火、氮气窒息预防及压缩机喘振抑制等关键管控技术。研究表明，系统性风险评估与分层防范能够有效降低石化空分装置的全局风险水平，为装置安全稳定运行提供科学依据。

关键词：空分装置；石油化工；安全风险评估；风险矩阵；防范措施

引言

石油化工企业配套的空分装置承担着向煤气化、加氢裂化、烷基化等核心工艺单元供应高纯度氧气和氮气的任务，是维系主装置连续运转的“生命线”工程。然而，空分装置本身即是典型的高风险系统——其原料为空气，产品为助燃剂和窒息性气体，过程涉及深低温（-196℃）、高压（可达数兆帕）及高速旋转机械，加之石油化工现场常伴生可燃气体和粉尘环境，风险耦合效应显著。近年来，国内外空分装置爆炸、冷箱坍塌、窒息中毒等安全事故屡有报道，暴露出部分企业在风险辨识不充分、评估方法不适用、防范措施碎片化等方面的共性问题。安全风险评估是安全管理的基础性工作，其目的在于系统识别潜在危险源，科学判定风险等级，进而制定针对性的管控对策。然而，石油化工空分装置的风险评估不能简单套用通用危化品评估模板，而应充分考虑其低温工程特性、与石化系统的相互影响以及停车恢复的极高代价。

1 石油化工空分装置危险源辨识

1.1 物料介质的固有危险性

空分装置全流程涉及空气、富氧空气、液氧、气氧、富氮气体、液氮及液氩等介质，各有其独特的危险属性。液氧的强助燃性是最大威胁——当液氧中碳氢化合物（尤其是乙炔）浓缩析出或遇到撞击、静电火花时，可能发生剧烈爆炸，其爆炸当量远超相同体积的烃类燃料。同时，富氧环境下燃烧反应速率急剧增加，常规阻燃材料在此条件下可能失去阻燃性能。氮气及富氮气体则具有窒息性，无色无味，在高浓度环境中可致人

瞬间失去知觉甚至死亡，且泄露后不易被察觉。此外，液氧、液氮的低温特性可导致设备材料脆性断裂和人员冻伤，低温液体大量泄漏时的急剧气化还能在有限空间内形成超压，引发物理爆炸。

1.2 关键工艺节点的风险辨识

在原料空气压缩段，风险集中于压缩机喘振和润滑油系统起火。喘振造成轴系剧烈振动，严重时可导致叶片断裂飞射，击穿机壳引发高压气体喷射；而润滑油在高温高压环境下与氧接触，存在着火风险。纯化系统的主要风险为分子筛吸附器切换阀故障引发的压力骤变，以及再生加热器超温导致分子筛床层烧蚀^[1]。精馏段的核心风险点为主冷凝蒸发器，液氧中碳氢化合物积聚达到临界浓度时即具备爆炸条件；此外，精馏塔压力失控可导致塔板吹翻或塔体破裂，低温液体大量外泄。膨胀机段风险集中于超速飞车和轴承烧损，超速时叶轮离心力超过材料强度极限而碎裂，碎片携带高动能穿透冷箱，后果极其严重。

1.3 石化特殊环境引入的附加风险

相较于独立空分工厂，石油化工配套空分装置面临额外的环境风险。周边装置的可燃气体泄漏若随风向扩散至空分装置空气吸入口，将直接引入烃类污染物，加重纯化系统负担并增加主冷爆炸风险。富氧区与含油设备、可燃管廊之间的距离若不足，一旦发生氧气泄漏，极易引发火灾蔓延。此外，石化厂区道路运输频繁、动火作业多，外部撞击和明火源对空分装置储槽区构成持续威胁。全厂电网波动和蒸汽管网压力不稳亦会传导至空分系统，在评估中不可忽略。

1.4 人员操作与检维修作业风险

空分装置运行中,操作人员需频繁进行分子筛切换、膨胀机启停、液体充装等作业,任何误操作都可能破坏冷量平衡或引发超压。在检维修环节,冷箱内动火作业涉及珠光砂塌陷风险、置换不彻底引燃风险;受限空间作业(如塔内检查)则面临缺氧或富氧双重威胁。人员对这些隐蔽危险缺乏足够认知,加之操作疲劳或培训不到位,是促成风险转化为事故的重要诱因。

2 安全风险评估方法构建

2.1 评估方法选择与适用性分析

常用的安全评估方法包括安全检查表法(SCL)、危险与可操作性分析(HAZOP)、故障模式与影响分析(FMEA)、事件树分析(ETA)、道化学火灾爆炸指数法及层次分析法(AHP)等。针对空分装置工艺连续性强、危险因素关联度高的特点,单一评估方法难以覆盖全部风险维度^[2]。本文构建“HAZOP+风险矩阵+AHP”的组合评估策略:以HAZOP为主导,对各工艺节点的参数偏离进行系统性分析,识别偏差原因及后果;以风险矩阵为基础,综合评定各风险事件的发生可能性和后果严重性;以AHP为辅助,对多维度风险因素进行权重排序,确保评估结果主次分明。

2.2 风险矩阵与风险等级划分标准

风险矩阵将风险定义为“发生概率(P)”与“后果严重程度(S)”的乘积。根据空分装置实际,将概率等级分为五级:A级(频繁,>1次/年)、B级(很可能,1次/1~5年)、C级(偶尔,1次/5~10年)、D级(极少,<1次/10年)、E级(几乎不可能)。后果严重程度划分为五级:I级(人员轻微伤害、直接损失<10万元)、II级(人员重伤、损失10~100万元)、III级(人员死亡1~2人、损失100~1000万元)、IV级(多人死亡、损失1000~5000万元)、V级(重大群死群伤、损失>5000万元)。据此将风险分为四级:重大风险($P \geq C$ 且 $S \geq IV$)、较大风险($P \geq C$ 且 $S \geq III$,或 $P \geq B$ 且 $S \geq IV$)、一般风险($P \geq D$ 且 $S \geq II$)和低风险(其余组合)。

2.3 空分装置典型风险事件评级

将第一节辨识的危险源代入风险矩阵,获得关键风险事件评级结果:主冷液氧中碳氢化合物积聚爆炸,评定为重大风险(概率C级、后果IV~V级);冷箱内管道低温脆断致大量液氧泄漏,评定为重大风险;膨胀机飞车碎片穿透冷箱,评定为重大风险;氮气大量泄漏致人员窒息,评定为较大风险(概率C级、后果III级);分子筛切换阀内漏引发压力波动,评定为较大风险;压缩机喘振损坏,评定为较大风险;润滑油系统着火,评定为

一般风险(概率D级、后果II~III级);低温液体管道外漏致冻伤,评定为一般风险。该评级结果为后续防范措施的优先级确定提供了直接依据。

2.4 动态风险评估理念

石油化工空分装置的负荷随主装置变化,不同负荷下的操作参数和危险程度存在差异。建议企业在年度定期评估基础上,建立动态风险评估机制——即在装置大修后、工艺变更前、负荷调整超过设计范围时,以及发生重大未遂事件后,立即启动专项风险评估,更新风险等级数据库,使防范措施始终与实际风险态势相匹配。

3 安全防范措施体系构建

基于风险评估结果,按照“预防为主、屏障分级、应急兜底”的原则,建立由本质安全设计层、主动保护层、被动保护层和应急响应层构成的四层防范体系。

3.1 本质安全设计与源头防控

本质安全是安全风险防范的最根本层级,其核心在于从工艺路线和设备选型阶段消减或降低危险。在主冷凝蒸发器设计中,应采用全浸没式结构,确保液氧连续沸腾循环,避免死区形成,从流场上抑制碳氢化合物局部浓缩。对关键受压容器严格执行应力分析设计,选用具有良好低温韧性的奥氏体不锈钢材料,并规定最低允许使用温度,避免脆性断裂。在总图布置上,将空分装置空气吸入口布设于全厂全年上风侧,且与可燃气体排放口、火炬、储罐区保持足够的安全间距;富氧设备与含油设施之间设置防火隔离墙^[3]。此外,采用仪表空气替代氮气作为部分阀门的驱动气源,减少氮气使用点和泄漏源,是从源头降低窒息风险的有效手段。

3.2 主动保护层:监测、联锁与自动控制

主动保护层在运行中持续发挥监控和保护作用,是防范风险的第二道屏障,也是日常操作中最依赖的防护手段。首先,针对主冷爆炸风险,必须配置在线式液氧中总烃及乙炔含量分析仪,要求连续监测、双通道冗余设置,一旦乙炔含量超过警戒值(通常为0.1ppm)立即触发联锁排液,超过高限(0.5ppm)则自动停车。同时,主冷温差和液氧液面波动应纳入DCS报警系统,设定变化速率报警,防止因工况突变造成的局部浓缩。第二项关键措施是膨胀机超速保护系统,需配置三取二冗余转速传感器,超速时同时触发紧急切断阀关闭和旁通阀开启,确保制动迅速可靠。压缩机防喘振控制系统应使用经现场标定的性能曲线,设置安全裕度,并采用防喘阀快开慢关策略,避免因仪表信号滞后导致的喘振误判或漏判。在氮气窒息预防方面,应在氮气可能积聚的封闭或半封闭区域(如冷箱夹层、氮气压缩机房、液体

储槽围堰内)设置固定式氧浓度探测器,并与通风系统联动,氧浓度低于19.5%时自动启动强排风机,低于18%时发出区域警报并禁止人员进入。

3.3 被动保护层:安全附件与物理隔离

被动保护层不依赖外部指令,能在非正常情况下自动发挥限压、泄放和隔离作用,是主动保护失效时的兜底保障。在精馏塔、吸附器、缓冲罐等所有带压力容器上,须按规范设置安全阀和爆破片,且安全阀的整定压力应分级设定,避免同时起跳造成系统崩溃。针对冷箱可能发生的超压工况,应在冷箱顶部及侧壁设置足够泄放面积的爆破板,其开启压力需低于冷箱结构承载极限,确保内部压力升高时定向泄压,防止箱体整体坍塌。液氧储罐和液氮储罐区应设置不小于罐体容积的防火堤或防液堰,内壁做防渗处理,且事故排放液体应导流至远离装置的安全收集池。冷箱外壁应敷设有阻燃性能的保温材料,且表面进行防水处理,防止湿气渗入导致珠光砂冻胀和支撑结构破坏^[4]。针对富氧环境,凡与氧接触的管道、阀门和仪表,均应经过严格脱脂处理,并在明显位置悬挂“富氧禁油”标识,从物理层面杜绝可燃物与氧接触的机会。

3.4 应急响应层:预案、演练与装备保障

即便防范措施层层设防,仍须为残余风险和意外叠加事件准备应急响应能力。编制专项应急预案,至少包括:主冷爆炸现场处置方案、大量氮气泄漏窒息救援方案、液氧管道泄漏火灾扑救方案、全厂断电下装置安全停车方案等。预案中应明确每类事故的报警等级、应急指挥架构、人员疏散路线及外部救援接口。每季度开展一次实战性应急演练,重点检验氧浓度探测器连锁风机是否启动、紧急切断阀是否动作、应急照明和通讯设备是否完好,以及人员在模拟窒息环境中的救援和心肺复苏技能。应急装备方面,配备自给式正压空气呼吸器(不得使用过滤式防毒面具,因其对窒息无效)、防低温冻伤防护服、非火花工具及防爆对讲机。液氧泄漏区域应设置水雾幕墙作为临时屏蔽,加速气化氧的扩散稀

释。此外,与周边装置及园区消防队建立应急联动机制,每年至少组织一次联合桌面推演,明确外部增援的进入路线和现场指挥权限移交程序,避免盲目施救造成次生事故。

4 结语

石油化工配套空分装置的安全风险评估与防范是一项涉及多学科、贯穿全生命周期的系统工程。本文通过系统辨识石化空分装置在物料介质、关键设备、外部环境和人员作业四个维度的危险源,构建了适用于该场景的风险评估流程与分级标准,明确了从重大风险到一般风险的差异化管控优先级。在此基础上提出的四层防范体系——本质安全设计从源头消减危险,主动保护层实施连续监控与连锁保护,被动保护层提供物理隔离与限压泄放,应急响应层处置残余风险——形成了纵深防御的安全屏障。需要强调的是,安全风险并非一劳永逸,随着装置运行年限增长、负荷工况变化以及外部环境变迁,风险态势处于持续演化之中。企业应建立动态评估和持续改进机制,将风险评估嵌入日常管理循环,并注重安全文化培育和人员行为管控,使“人—机—环境—管理”各要素协调运作。唯有如此,才能从根本上遏制空分装置重大安全事故的发生,为石油化工主装置的平稳运行筑牢安全基石。

参考文献

- [1]孙德胜,王建伟,刘洋.空分设备主冷凝蒸发器碳氢化合物积聚风险及控制策略[J].深冷技术,2022,45(4): 29-35.
- [2]郑晓峰,李建中,周洪.基于HAZOP-LOPA的空分装置风险评估方法研究[J].化工安全与环境,2023,34(2): 56-62.
- [3]马国栋,张华军,陈亮.低温液氧储罐泄漏扩散模拟及安全距离研究[J].中国安全生产科学技术,2021,17(8): 23-29.
- [4]吴建辉,孙丽萍,赵刚.氮气窒息事故致因分析与防控措施探讨[J].工业安全与环保,2024,50(1): 42-47.