

基于风险分级管控的锅炉-空分一体化安全管理体系构建与实践

张 哲

江苏省嘉宏新材料有限公司 江苏 连云港 222000

摘 要：随着现代工业向集约化、连续化和高参数方向发展，锅炉系统与空分装置作为能源转换与气体供应的核心单元，在石化、冶金、电力等行业中发挥着不可替代的作用。然而，由于其高温高压、易燃易爆、有毒有害等固有危险特性，加之系统间高度耦合、运行工况复杂，一旦发生事故，极易引发连锁反应，造成重大人员伤亡和经济损失。传统“碎片化”“事后型”的安全管理模式已难以满足当前高风险工业系统的安全需求。本文提出并构建了一套基于风险分级管控的锅炉-空分一体化安全管理体系。该体系融合过程安全管理（PSM）、HAZOP分析、LOPA保护层分析、SIL定级及动态风险评估等先进方法，通过建立统一的风险识别—评估—分级—控制—监控闭环机制，实现对锅炉-空分联合系统的全生命周期、全过程、全员参与的安全协同管理。

关键词：锅炉；空分装置；风险分级管控；一体化安全管理体系；过程安全管理；HAZOP；LOPA；SIL

引言

锅炉作为工业热动力设备，承担蒸汽生产与热能转换重任；空分装置通过低温精馏分离出高纯度工业气体，广泛应用于多领域。在大型联合装置里，二者常集成形成“锅炉-空分一体化”模式，如空分氧气助煤气化炉燃烧，锅炉蒸汽驱动空分设备或用于工艺加热。此模式虽提升能源利用率，却带来新安全挑战。系统强耦合使子系统异常易传导，引发连锁事故；锅炉高温高压、空分深冷富氧，危险源多且交互复杂，传统管理模式难应对；操作协调难度大，关键节点缺乏统一指挥易致严重后果；且二者安全监管标准分属不同法规，缺乏协同框架，加剧管理割裂。

1 锅炉-空分系统典型风险特征分析

1.1 锅炉系统主要风险

锅炉系统高温高压运行，处于高能量状态，安全屏障失效易引发严重事故。超压爆炸破坏性大，常因安全阀卡涩、压力控制系统失灵或操作失误，使压力超压部件强度极限而爆炸。缺水干烧常见且隐蔽，水位监测仪表故障或给水调节阀失灵，炉管会过热变形甚至爆裂，损毁设备还可能引发次生火灾。燃料系统（如天然气、煤气）泄漏，在密闭空间积聚至爆炸极限，遇点火源，点火、熄火或负荷调整时更易爆燃。烟道二次燃烧是未完全燃烧可燃物在尾部烟道沉积，温度适宜时重新点燃致局部超温损坏。锅炉与空分耦合运行时，这些风险的触发条件和传播路径或因外部系统扰动而改变。

1.2 空分装置主要风险

空分装置风险主要来自深冷环境与高浓度氧气。富氧条件下，油脂等常规不易燃物极易被引燃且燃烧迅猛，火灾扑救难度大。低温介质如液氧、液氮泄漏，会使操作人员冻伤，还会让碳钢等材料低温脆断致设备破裂^[1]。氮气大量泄漏会稀释氧气，局部氧含量低于19.5%时人员易窒息。分子筛吸附器若切换程序故障或再生不彻底，二氧化碳或水分会穿透进入冷箱，低温下冻结堵塞主换热器通道，使系统压降剧增甚至被迫停车。空分独立运行时风险可通过严格规程控制，但与锅炉系统共享能源或工艺气体时，故障传播效应会显著放大。

1.3 耦合风险场景识别

最为突出的是“空分跳车→锅炉缺氧熄火→燃料积聚→爆燃”这一连锁反应链。当空分装置因电网波动或设备故障突然停止供氧时，锅炉燃烧器因缺氧而熄火，但若燃料切断联锁未能及时动作，未燃燃料将在炉膛内持续积聚，一旦恢复供氧或存在其他点火源，极易发生爆燃。另一典型场景是“锅炉蒸汽中断→空分透平停机→冷箱超压”。在该企业中，空分空气压缩机由背压式汽轮机驱动，依赖锅炉提供的稳定蒸汽。若锅炉因故障停汽，透平转速骤降，空分系统无法维持正常精馏工况，冷箱内压力可能因气体膨胀而失控，威胁设备安全。此外，共用的DCS控制系统若遭遇网络攻击或电源故障，可能导致锅炉与空分同时失去监控与调控能力，形成双系统失控局面。检修期间的交叉作业风险亦不容忽视，例如在锅炉检修时未有效隔离与空分相连的蒸汽管线，可能导致空分意外受热或压力波动，反之亦然。

这些耦合风险具有高度的隐蔽性和突发性，传统孤立的风险管理方法难以有效识别和防控。

2 基于风险分级管控的一体化安全管理体系构建

2.1 体系设计原则

为有效应对锅炉-空分系统的复杂风险，本体系在设计之初即确立了四项核心原则。首先是系统性原则，强调打破锅炉与空分在专业、管理、操作上的壁垒，将其视为一个有机整体进行风险统筹。其次是前瞻性原则，摒弃“亡羊补牢”式的被动管理，聚焦于潜在失效模式的早期识别与干预。第三是动态性原则，认识到风险并非静态存在，而是随设备老化、工艺变更、操作模式调整等因素不断演化，因此管理体系必须具备实时感知与响应能力。最后是全员参与原则，安全不仅是安全部门的责任，更需要设计、操作、维护、管理各层级人员的共同参与和责任落实，形成“人人有责、层层负责”的安全文化。

2.2 体系架构

本体系采用“四层三环”架构，旨在实现风险管

控的系统化与闭环化。“基础层”整合了国家法律法规、行业标准规范、设备技术档案及标准化操作程序（SOP），为整个体系提供制度与数据支撑。“识别层”运用HAZOP、What-If、作业安全分析（JSA）等多种工具，对联合系统进行全面、系统的危害辨识。“评估层”则通过风险矩阵法进行初步分级，并对高风险场景引入LOPA（保护层分析）和QRA（定量风险分析）进行深入评估，确保风险量化科学合理^[2]。“控制层”涵盖工程技术措施（如安全联锁、泄压装置）、管理控制程序（如操作规程、变更管理）、个体防护装备（PPE）以及应急预案四大类措施，形成多层次防护屏障。整个体系通过“风险识别→评估分级→控制监控→再评估”的PDCA闭环机制持续运行与优化，确保风险始终处于受控状态。

2.3 风险分级标准制定

参考GB/T 33000-2016《企业安全生产标准化基本规范》及CCPS风险矩阵，结合企业实际，制定四级风险分级标准：

表1 风险分级标准

风险等级	后果严重度	发生可能性 (R = S×L)	风险值	管控要求
重大风险（红色）	死亡 ≥ 3人或直接损失 ≥ 1000万元	≥ 1次/年	R ≥ 25	停产整改，专项预案，最高管理层督办
较大风险（橙色）	死亡1-2人或损失100-1000万元	1次/1-5年	15 ≤ R < 25	限期整改，增设SIS，定期演练
一般风险（黄色）	重伤或损失10-100万元	1次/5-10年	8 ≤ R < 15	日常监控，加强培训，完善SOP
低风险（蓝色）	轻伤或损失 < 10万元	< 1次/10年	R < 8	常规管理，员工自查

2.4 关键技术方法集成

2.4.1 HAZOP分析全覆盖

组织跨专业团队（锅炉、空分、仪表、安全工程师）对联合系统开展HAZOP分析，节点划分兼顾工艺流与能量流。例如，将“锅炉给水-蒸汽管网-空分透平蒸汽入口”设为一个分析节点，识别蒸汽压力波动对双方的影响。

2.4.2 LOPA与SIL定级

对HAZOP识别出的高风险场景（如“空分跳车导致锅炉爆燃”），采用LOPA分析现有保护层（如DCS联锁、SIS、操作规程）的有效性。若风险仍不可接受，则提出新增独立保护层（IPL），并依据IEC 61511进行SIL定级。例如，为防止燃料积聚，增设“氧气流量低低+火焰检测无信号→紧急切断燃料”SIS回路，定为SIL2。

2.4.3 动态风险评估平台

开发基于DCS实时数据的风险评估模块，当关键参数（如氧浓度、蒸汽压力、水位）偏离正常范围时，自

动计算当前风险值并推送预警。例如，当空分出口氧纯度 < 99.2%且锅炉负荷 > 80%时，系统自动标记为“橙色风险”，提示操作员准备降负荷。

3 一体化安全管理体系的实践路径

基于风险分级管控的锅炉-空分一体化安全管理体系的有效落地，需遵循“组织保障—风险识别—工程与管理协同—动态监控—持续改进”的五阶段递进式实施路径。

3.1 组织协同与制度融合阶段

体系实施的首要任务是建立跨专业的协同治理机制。企业应成立由高层管理者牵头的一体化安全管理领导小组，成员涵盖锅炉、空分、仪表、电气、安全及生产调度等关键岗位代表，明确其在联合风险决策、应急指挥、检修协调中的权责边界。在此基础上，系统梳理并整合原有分散的管理制度，制定或修订《锅炉-空分联合装置安全操作规程》《交叉作业能量隔离管理规定》《共用控制系统维护标准》等专项制度^[3]。这些制度需明确规定双方在启停、变负荷、联锁测试、异常工况处置

等关键操作中的协同流程、信息通报机制与时序要求,从管理源头消除因职责不清或沟通不畅导致的操作冲突,为后续技术措施的落地提供组织与制度保障。

3.2 系统化风险识别与工程防护强化阶段

在组织与制度基础夯实后,应开展覆盖全系统的危害辨识与风险评估工作。重点在于突破传统按装置划分的分析模式,将锅炉蒸汽管网、空分氧气/氮气管线、共用电源与控制系统等耦合接口纳入统一分析范围,重新定义跨系统分析节点。通过HAZOP等结构化方法,系统识别因一方异常引发另一方连锁失效的潜在场景,并利用LOPA对高风险场景进行半定量验证。基于评估结果,针对性地强化工程防护措施:对存在不可接受风险的耦合点,应增设独立的安全仪表系统(SIS),并依据IEC 61511标准完成SIL定级与设计;对共用能源或控制回路,应考虑冗余配置、硬接线联锁或物理隔离等手段,降低共因故障概率。所有工程改造必须严格遵循功能安全规范,并通过独立第三方验证,确保保护层的可靠性与独立性。

3.3 管理程序融合与人员能力提升阶段

工程技术措施的有效性高度依赖配套管理程序的支持与人员的正确执行。因此,必须同步推进管理融合与能力建设。在操作层面,可推行“双岗确认”机制,即任一子系统执行重大操作前,需获得另一子系统操作人员对关键状态参数(如供氧压力、蒸汽品质)的书面或电子确认。在应急管理方面,应将原各自独立的应急预案整合为联合应急响应预案,定期围绕典型耦合事故场景开展桌面推演与实战演练,重点检验跨系统信息传递、指令协同与资源调配的效率^[4]。在人员培训上,需开发面向操作、维护及管理者的跨专业知识模块,内容应涵盖对方系统的基本原理、主要危险源、典型故障现象及协同处置要点,并通过考核认证确保知识内化。唯有实现“人一机一管”三者的深度融合,工程防护措施才能真正发挥预期效能。

3.4 动态风险监控与持续改进机制构建阶段

风险管理不能止步于静态评估与一次性整改,必须建立动态感知与持续优化机制。企业应建设基于实时数据的动态风险评估平台,通过工业通信协议(如OPC UA)集成锅炉与空分DCS、SIS、设备状态监测等系统的多源数据,构建耦合风险评估模型。当关键参数组合偏离正常工况时,平台应能自动计算当前风险等级,并向相关人员推送分级预警。同时,建立以领先指标为导向的管理评审机制,定期分析预警记录、SIS动作频次、操作干预次数等数据,识别管理体系的薄弱环节。结合隐患排查、变更管理、事故/未遂事件调查等输入,对风险数据库、控制措施有效性及操作规程进行滚动更新,形成“监测—评估—改进—再监测”的PDCA闭环,确保体系始终适应工艺、设备及外部环境的变化。

4 结语

本文针对锅炉-空分联合运行系统的高风险、强耦合特性,构建并实践了一套基于风险分级管控的一体化安全管理体系。该体系以系统思维为核心,通过风险识别、科学评估、精准分级、协同控制和动态监控五大环节,实现了从“被动应对”向“主动预防”的转变。该体系可提升企业的本质安全水平和应急处置能力,具有良好的工程应用价值和推广前景。未来,随着工业互联网与人工智能技术的发展,一体化安全管理体系将进一步向智能化、自适应方向演进,为高危工业系统的长周期安全稳定运行提供坚实保障。

参考文献

- [1]商振东.精细化工企业安全生产中的风险分级管控与事故预防[J].天津化工,2025,39(03):146-148.
- [2]伊秀莉,孔祥虎.化工企业安全生产风险分级及管控措施分析[J].当代化工研究,2024,(12):184-186.
- [3]於娟娟.化工企业安全生产风险分级及管控措施[J].化工管理,2023,(26):94-96.
- [4]施倚.化工行业风险分级管控中风险分级管控措施有哪些[J].劳动保护,2022,(10):85.