

煤化工储运系统安全风险评估与防控策略研究

聂冉冉

内蒙古大唐国际克什克腾煤制天然气有限责任公司 内蒙古 赤峰 025350

摘要: 本文旨在系统性地研究煤化工储运系统的安全风险。首先,深入剖析了煤化工储运系统的主要构成及其固有危险特性;其次,构建了一套融合定性与定量方法的风险评估体系,重点引入了改进的层次分析法(AHP)与模糊综合评价法相结合的模型;再次,基于风险评估结果,从技术、管理、应急三个维度,提出了具有针对性和可操作性的综合防控策略。研究表明,只有通过科学的风险识别、精准的风险评估和系统化的防控措施,才能从根本上提升煤化工储运系统的本质安全水平,为产业的绿色、安全、可持续发展提供坚实保障。

关键词: 煤化工;储运系统;安全风险评估;风险防控;层次分析法

引言

在全球能源结构转型与“双碳”目标的背景下,我国“富煤、贫油、少气”的资源禀赋决定了煤炭在未来相当长一段时间内仍将作为基础能源。煤化工,特别是现代煤化工,通过将煤炭转化为清洁燃料和高附加值化学品,是实现煤炭资源高效、清洁、高值化利用的重要路径。然而,煤化工产业的快速发展也伴随着严峻的安全挑战。煤化工生产流程长、工艺复杂,涉及的物料种类繁多,包括但不限于煤粉、合成气(主要成分为 H_2 、 CO)、甲醇、液氨、液化石油气(LPG)、苯、焦油等。这些物料普遍具有易燃、易爆、有毒、腐蚀性强等危险特性。储运系统作为煤化工产业链中承上启下的关键环节,承担着原料输入、中间产品周转和最终产品输出的重任,其运行状态直接关系到整个工厂的安全稳定。传统的安全管理多侧重于事后处理和经验总结,缺乏对风险的前瞻性、系统性和量化评估。面对日益复杂的煤化工储运系统,亟需建立一套科学、全面、动态的风险评估与防控体系。为此,本研究聚焦煤化工储运系统,旨在揭示安全短板,提出防控策略,为企业和政府提供参考支持。

1 煤化工储运系统构成与危险特性分析

煤化工储运系统是一个复杂动态系统,核心是实现物料安全高效流转,可划分为多个子系统。储存系统风险集中,固体物料储存中,原煤等煤粉遇明火等易粉尘爆炸;液体物料储存采用多种罐体,存在储罐泄漏、附件失效、雷击引发火灾等风险;气体物料储存中,高压或低温条件下设备密封失效会致易燃易爆气体泄漏。输送系统负责物料转移,管道输送存在因腐蚀等原因穿孔断裂的风险;机泵输送中离心泵等机械密封失效会泄漏,设备也易故障;气力/带式输送固体粉料时,粉尘逸

散、堵塞摩擦过热会引发火灾或爆炸^[1]。装卸与转运系统人-机-物交互频繁,铁路/公路装卸存在鹤管密封失效、静电积聚等风险;码头装卸还需考虑恶劣天气等额外风险。辅助与安全设施系统是安全最后防线,消防系统有效性决定事故后果,气体检测与报警系统是早期预警关键,紧急切断系统能防止事态扩大,防雷防静电设施对易燃易爆物料储运至关重要。总之,该系统危险特性显著,系统性风险评估是安全管理前提。

2 煤化工储运系统安全风险评估体系构建

科学的风险评估是风险防控的基础。针对煤化工储运系统的复杂性,本文构建了一个“识别-分析-评价”三位一体的综合风险评估体系。

2.1 风险识别

风险识别是评估的第一步,旨在全面、系统地找出所有潜在的危险源和风险事件。可采用的方法包括:

(1)安全检查表(SCL):依据国家法规、行业标准和企业历史经验,编制涵盖所有设备、设施和作业活动的检查清单。(2)工作危害分析(JHA):针对装卸、检维修等具体作业活动,分解作业步骤,识别每一步骤的潜在危害^[2]。(3)危险与可操作性分析(HAZOP):对于关键的工艺管线和储罐,通过引导词(如“无”、“多”、“少”、“反向”等)系统地审查设计意图与实际运行的偏差,找出潜在风险。

2.2 风险分析与评价模型

在识别出风险事件后,需要对其发生的可能性(L)和后果严重程度(S)进行量化或半量化分析,并计算风险值($R = L \times S$)。本文提出一种基于改进层次分析法(AHP)与模糊综合评价法相结合的评估模型,以克服传统方法主观性强、难以处理模糊信息的缺点。

2.2.1 构建风险评估指标体系

根据前述系统构成与危险特性，构建一个多层次的风险评估指标体系。目标层为“煤化工储运系统综合安全风险”，准则层可划分为：设备设施风险（ U_1 ）、物料固有风险（ U_2 ）、作业活动风险（ U_3 ）、安全管理风险（ U_4 ）、环境与外部风险（ U_5 ）。每个准则层下再细分指标层，例如 U_1 可细分为储罐风险、管道风险、机泵风险等。

2.2.2 基于改进AHP确定指标权重

传统AHP依赖专家对指标两两比较时采用1-9标度，主观性强且易产生判断矛盾。本文引入三标度改进法以降低认知偏差：

专家仅需判断任意两个指标间的重要性关系，采用简化标度：

- 1表示“同等重要”，
- 2表示“前者比后者重要”，
- 0表示“后者比前者重要”。

通过数学转换公式（如 $a_{ij} = 2^{x_{ij}-1}$ ，其中 $x_{ij} \in \{0,1,2\}$ ）将三标度矩阵转化为标准九标度判断矩阵；进而计算权重向量 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ ，并进行一致性比率（CR）检验，确保 $CR < 0.1$ ，以保证判断逻辑的合理性。该方法简化了专家打分过程，提高了判断矩阵的稳定性与可信度。

2.2.3 基于模糊综合评价进行风险等级评定

由于风险等级（如“低”“中”“高”）本质上属于语言变量，具有模糊性和边界不清的特点，模糊综合评价法能有效处理此类不确定性信息。

具体步骤如下：

第一，确定评语集：设定风险等级评语集 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} = \{\text{低风险, 较低风险, 中风险, 较高风险, 高风险}\}$ 。

第二，构建隶属度矩阵 R ：邀请5-7位具有煤化工背景的安全专家，对每个底层指标隶属于各风险等级的程度进行打分（采用0-1区间值，如0.2表示“较弱隶属”），形成模糊关系矩阵 $R = [r_{ij}]_{m \times 5}$ 。

第三，模糊合成运算：采用加权平均型模糊算子 $M(\cdot, \oplus)$ ，计算综合评价向量：

$$B = W \circ R = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5)$$

其中 $b_j = \sum_{i=1}^m w_i \cdot r_{ij}$ ，反映系统整体对各风险等级的隶属程度。

第四，去模糊化处理：为便于决策，将模糊结果转化为具体风险分值。设评语集对应数值化赋值（如低 = 1，较低 = 2，中 = 3，较高 = 4，高 = 5），则综合风险分值为：

$$R_{\text{score}} = \sum_{j=1}^5 b_j \cdot v_j^{\text{num}}$$

该分值可用于风险排序、区域划分或预警阈值设定。

该混合模型将专家经验、模糊逻辑与定量计算有机融合，不仅提升了评估结果的科学性与鲁棒性，还增强了风险等级判定的可解释性与可追溯性，为煤化工企业制定差异化、精准化的风险管控策略提供有力支撑。

3 煤化工储运系统安全风险防控策略

3.1 技术防控策略（提升本质安全水平）

3.1.1 设备本质安全化

优先选用符合《石油化工储运系统设计规范》《压力容器安全技术监察规程》等最新标准的设备与材料。例如：对易燃易爆介质储罐采用“内浮顶+氮气密封”组合设计，有效抑制蒸气空间形成；输送泵采用双端面机械密封或磁力驱动泵，从结构上杜绝泄漏源；管道系统选用高等级耐腐蚀材料（如316L不锈钢、双相钢），并设置阴极保护与腐蚀监测点；在爆炸危险区域全面采用ExdIIC T4及以上等级的本质安全型或隔爆型电气设备，降低点火源风险。

3.1.2 自动化与智能化升级

构建“感知—分析—决策—执行”闭环的智能监控体系：部署DCS（分布式控制系统）实现全流程工艺参数集中监控；配置独立的SIS（安全仪表系统），在超压、超温、液位异常等工况下自动触发紧急切断、泄放或停机连锁；布设GDS（可燃气体与有毒气体检测系统），在装卸区、泵区、管廊等关键位置实现全覆盖、高灵敏度监测；探索应用数字孪生技术，基于实时数据构建储运系统的高保真虚拟模型，支持风险动态推演、故障预测与应急推演，实现“风险可视、隐患可预、事故可防”^[3]。

3.1.3 泄漏检测与修复（LDAR）常态化

建立覆盖全厂动静密封点（阀门、法兰、泵、压缩机等）的LDAR管理体系，采用红外热成像仪、便携式FID/PID检测仪等先进手段，按季度或月度周期开展检测，对发现的泄漏点实行“建档—修复—复测—闭环”管理，显著减少VOCs无组织排放，既保障安全，又满足环保合规要求。

3.1.4 先进消防技术适配化配置

针对煤化工储运介质多样性（如甲醇、液氨、苯类、煤焦油等），实施“一物一策”的消防策略：对水溶性可燃液体（如甲醇、丙酮），必须采用抗溶性泡沫（AFFF-AR）灭火系统；对液氨等有毒介质，除设置水喷雾稀释系统外，还需配备专用吸收中和装置；在大型

储罐区推广设置固定式泡沫-水喷淋联用系统,并与火灾报警系统联动,实现早期快速响应。

3.2 管理防控策略(夯实安全基础)

3.2.1 健全安全管理体系

以《危险化学品安全管理条例》《化工过程安全管理实施导则》(AQ/T3034)为纲领,全面推行过程安全管理(PSM),将风险管控嵌入项目全生命周期——从工艺危害分析(PHA)到设备完整性管理(MI),从操作规程制定到事故调查改进,形成PDCA闭环。同时,严格落实“一岗双责、齐抓共管、失职追责”的全员安全生产责任制。

3.2.2 强化变更管理(MOC)

任何涉及工艺参数调整、设备替换、物料替代、操作程序修改或组织架构变动的“变更”,均须启动MOC流程:由跨专业团队开展变更前风险评估(可结合HAZOP或What-If分析);明确变更的技术依据、安全措施与应急预案;经授权人员审批后方可实施,并对相关人员进行变更告知与培训;变更后进行效果验证与资料归档,防止“小改动引发大事故”。

3.2.3 提升人员安全素养与行为安全

针对装卸工、检维修人员、中控操作员等高风险岗位,开展“场景化+实操化”培训,如模拟泄漏处置、受限空间救援、静电危害认知等。同时,建立“正向激励+负向约束”相结合的安全绩效机制,通过安全积分、隐患举报奖励、违章曝光台等方式,推动从“要我安全”向“我要安全、我会安全、我能安全”的文化转变。

3.2.4 加强承包商一体化管理

将承包商视为企业安全管理的延伸单元,实施“五统一”管理:统一标准、统一培训、统一监督、统一考核、统一奖惩。严把准入关(资质、业绩、人员持证),强化作业前安全交底与JSA(作业安全分析),作业中实施“双监护”制度(业主+承包商),杜绝“以包代管、一包了之”的管理盲区。

3.3 应急防控策略(降低事故后果)

3.3.1 完善应急预案体系

基于风险评估结果,针对储罐区火灾爆炸、长输管道泄漏、槽车装卸事故、有毒气体扩散等典型场景,编制“横向到边、纵向到底”的应急预案体系,包括综合预案、专项预案和现场处置卡^[4]。预案内容应明确响应分级、职责分工、处置流程、疏散路线、警戒范围及与地

方政府(消防、环保、卫健)的联动接口,确保“上下贯通、内外衔接”。

3.3.2 强化应急能力建设

按照“宁可备而不用,不可用而无备”原则,配备足量、适用、先进的应急物资:堵漏器材(如夹具、堵漏胶、磁压堵漏工具);吸附与中和材料(吸油毡、活性炭、酸碱中和剂);个体防护装备(A级防护服、自给式呼吸器、防化手套);通信与照明设备(防爆对讲机、移动照明灯组)。同时,组建由专职消防队、工艺处置组、医疗救护组构成的专业化应急救援队伍,定期开展体能、技能与协同训练,并与属地消防支队、医院建立“一键联动”机制,实现“1分钟响应、3分钟到场、5分钟处置”。

3.3.3 开展情景构建与实战化演练

改变“演为看、练为考”的形式主义,推行“无脚本、双盲、多灾种耦合”的实战演练。例如:模拟“雷击导致储罐呼吸阀失效+周边泵区泄漏+人员中毒”复合场景,检验多部门协同、信息报送、工艺隔离、人员疏散、舆情应对等综合能力。演练后开展深度复盘,运用“根本原因分析(RCA)”方法,持续优化预案与流程,真正实现“打一仗、进一步”。

4 结语

煤化工储运系统安全是产业发展生命线。本文构建融合改进AHP与模糊综合评价的风险评估模型,提出涵盖技术、管理和应急的综合防控策略,得出风险具系统性、评估需科学化、防控应多元化的结论。展望未来,随着新一代信息技术发展,可探索基于大数据的风险动态预警、数字孪生驱动的智能巡检维护及韧性安全理论应用等。唯有不断创新安全管理模式与技术手段,才能驾驭复杂风险,为能源化工产业高质量发展护航。

参考文献

- [1]国家安全生产监督管理总局.危险化学品重大危险源监督管理暂行规定[Z].2011.
- [2]李志华,等.基于AHP-模糊综合评价的化工园区安全风险[J].中国安全科学学报,2019,29(05):171-176.
- [3]赵来军,等.危险化学品储运安全风险智能预警模型研究[J].系统工程理论与实践,2020,40(08):2215-2225.
- [4]国务院安全生产委员会.全国危险化学品安全风险集中治理方案[Z].2022.