

危化行业安全风险致因分析与精准防控体系研究

曹 刚

鞍钢集团本钢北营公司能源总厂 辽宁 本溪 117000

摘 要：危化行业作为国民经济的重要支撑产业，其安全生产问题始终是社会关注的焦点。本文立足于我国危化行业安全生产现状，运用系统安全理论与风险管理方法，深入剖析危化行业安全风险的多维致因因素，构建起涵盖人因失误、设备缺陷、环境异常、管理漏洞四维度的综合致因分析模型。在此基础上，本文提出以风险辨识精准化、评估科学化、预警智能化、管控差异化为核心特征的精准防控体系框架，并从制度保障、技术支撑、能力建设三个层面探讨体系实施路径。研究表明，从传统粗放式安全管理向精准化风险防控转型，是提升危化行业本质安全水平的必然选择。本文研究成果可为危化企业安全管理实践及政府监管决策提供理论参考与实践指导。

关键词：危化行业；安全风险；致因分析；精准防控；体系构建

引言

危化行业涉及危险化学品的生产、储存、运输、经营及使用等多个环节，其产业链条长、风险点分散、事故后果严重，是安全生产监管的重点与难点领域。近年来，随着我国工业化进程加速，危化行业规模持续扩大，新技术、新工艺、新材料的应用在提升生产效率的同时，也带来了新型风险挑战。尽管全国危化品事故起数和死亡人数总体呈下降趋势，但重特重大事故仍时有发生，暴露出行业在风险认知、隐患治理、应急响应等方面存在深层次问题。传统安全管理模式以事后追责、经验判断为主要特征，难以适应复杂动态风险环境下的防控需求。因此，系统识别危化行业安全风险的关键致因因素，构建科学高效的精准防控体系，对于遏制重特重大事故发生、提升行业整体安全水平具有重要的理论价值与现实意义。

1 危化行业安全风险特征与演化规律

1.1 危化行业安全风险的基本特征

危化行业安全风险呈现出显著的复杂性特征。首先是突发性强，危化品泄漏、火灾、爆炸等事故往往在瞬间发生，留给应急响应的时间窗口极为有限。其次是连锁性突出，初始事件可能通过多米诺效应引发次生、衍生灾害，造成后果的级联放大。再次是隐蔽性高，设备腐蚀、仪表漂移、管理缺位等致因因素长期潜伏于生产系统中，难以被常规检查手段及时发现。最后是危害范围广，有毒有害物质的扩散可能影响周边社区环境，形成社会性风险。

1.2 风险演化的一般过程

从系统安全视角审视，危化行业安全风险演化遵循“风险孕育—风险触发—事故发展—后果扩展”的基本

路径。在正常生产状态下，各类安全屏障共同维持系统稳定运行。当某些致因因素导致保护层功能削弱时，风险开始积聚。一旦触发事件发生并突破多层防护，事故便从初始阶段向失控阶段演进。理解这一演化链条，关键在于识别各阶段的关键控制节点及其失效模式。

2 危化行业安全风险多维致因分析

2.1 人因维度：认知偏差与行为失范

人因失误是危化事故的主要诱因之一。认知心理学研究表明，操作人员在复杂工业环境下的决策过程受到有限理性、信息过载、压力应激等因素的制约。感知偏差表现为对异常工况的识别延迟或误判；判断偏差表现为在模糊情境下选择非最优行动方案；操作偏差则表现为技能型失误或规则型违规^[1]。行为失范进一步可分为无意失误与有意违规两类，前者源于能力与任务的匹配不足，后者则与激励导向、监管效力密切相关。值得注意的是，组织因素通过塑造个体认知与行为模式，构成人因失误的深层根源。

2.2 设备维度：老化退化与可靠性不足

设备设施的完整性是危化生产安全的基础保障。随着服役年限增长，设备面临腐蚀减薄、材质劣化、密封失效等退化问题，事故概率呈上升趋势。仪表控制系统若存在冗余设计不足、故障诊断功能缺失、网络安全防护薄弱等问题，可能在关键工况下失效。安全阀、爆破片、紧急切断阀等安全附件的定期检验与维护若不到位，将导致最后一道防线虚设。此外，设备选型不当、安装质量缺陷、维修工艺不规范等全生命周期各环节的问题，均可成为风险隐患的源头。

2.3 环境维度：作业条件与外部干扰

环境因素包括作业微环境与外部宏环境两个层面。

作业微环境方面,温度、湿度、通风、照明等条件异常可能直接影响人员操作绩效与设备运行状态。例如,高温环境加速反应失控风险,通风不良导致有毒气体积聚。外部宏环境方面,极端天气事件如台风、洪涝、雷击等可能造成储罐浮顶损坏、电力中断、控制系统失常。周边活动如邻近施工、交通运输等也可能对危化设施构成外部侵袭风险。环境因素的动态性与不可控性,增加了风险管理的难度。

2.4 管理维度:制度缺陷与执行偏差

管理因素是连接其他三个维度的枢纽,其缺陷往往具有系统性影响。制度层面的问题表现为法规标准体系不完善、安全责任划分不清、操作规程缺失或不当、应急预案针对性不足等。执行层面的偏差更为普遍,包括安全检查流于形式、隐患整改闭环不严、培训教育效果不佳、变更管理失控等^[2]。更深层次的问题则在于管理理念的滞后——部分企业仍停留在“符合性”合规管理阶段,尚未建立起基于风险的过程安全管理思维。管理体系的失效使人因、设备、环境方面的风险无法得到有效识别与控制。

2.5 多因素耦合效应分析

上述四个维度并非孤立作用,而是通过复杂的非线性耦合机制共同影响系统安全状态。人因与设备的交互表现为操作错误引发设备损坏,或设备异常增加人员操作负荷;人与环境的交互表现为恶劣条件加剧认知疲劳;管理与所有维度的交互则体现在管理措施对各层次风险的控制或放大效应。更值得警惕的是“共因失效”现象——某一根本原因同时导致多个保护层功能丧失,使系统防御能力急剧下降。因此,精准防控不能仅关注单一因素的独立效应,必须从系统耦合视角设计综合管控策略。

3 精准防控体系的理论框架与构成

3.1 精准防控的核心内涵与原则

精准防控是指基于风险特征的系统辨识与差异化管理,在正确的时间、正确的地点、对正确的风险对象采取恰当有效的管控措施。其核心内涵可概括为四个精准:风险辨识精准,即能够准确定位高概率、高后果风险源;风险评估精准,即量化方法适用、参数选取合理、结果置信度达标;风险预警精准,即阈值设定科学、误报漏报率可控、响应联动及时;风险管控精准,即措施针对性、层级合理性、资源配置优化性。构建精准防控体系应遵循以下原则:风险导向原则,将所有活动聚焦于重大风险控制;分级管控原则,建立企业—车间—岗位三级风险责任体系;动态优化原则,根据运行

数据持续调整防控策略;系统集成原则,实现各管理要素的协同运作而非碎片化实施。

3.2 体系总体架构设计

精准防控体系总体架构可概括为“一核两翼三层四维”。一核即以风险辨识与评估为核心基础;两翼指技术支撑与管理保障两大驱动力量;三层包括战略决策层(企业高层)、战术执行层(职能部门)与操作实施层(一线岗位);四维即覆盖人、机、环、管四个风险维度。体系运行遵循PDCA循环逻辑:策划阶段完成风险数据库建设与防控目标设定;实施阶段落实分级管控措施与技术手段;检查阶段开展绩效监测与符合性审计;改进阶段运用数据分析结果推动体系迭代升级。

3.3 风险辨识与评估模块

该模块是精准防控体系的技术基石。风险辨识应遵循全面性与重点性相结合的原则,采用HAZOP、LOPA、FMEA等结构化方法系统梳理工艺过程中潜在的危险情景。针对辨识出的风险点,运用后果模拟软件(如DNV PHAST、FLACS等)预测泄漏扩散、火灾热辐射、爆炸超压等影响范围,结合人员暴露水平与设备脆弱性进行量化风险表征。风险评估结果应以风险矩阵或风险等高线的形式可视化呈现,便于管理层直观把握风险全貌^[3]。需特别强调的是,风险评估不是一次性工作,应随工艺变更、设备更新、法规调整定期更新。

3.4 分级预警与应急联动模块

精准预警要求建立多级预警指标体系,既包括工艺参数阈值报警(如温度、压力、浓度等),也包括设备状态预警(如振动趋势、腐蚀速率、剩余寿命等),还应纳入行为安全预警(如违章频次、注意力监测等)。预警模型可采用统计过程控制、机器学习分类算法等方法,平衡灵敏度与特异性。预警信息的分级推送机制应明确各级响应的责任主体、响应时限与升级条件。应急联动方面,需将预警系统与紧急停车系统、消防设施、人员疏散广播、政府应急平台进行技术对接,形成“预警—确认—处置—反馈”的闭环链路。

3.5 差异化管控策略设计

不同风险等级、不同风险类型需要适配差异化的管控策略。对于不可接受的高风险区域,必须采取工程控制措施(如本质安全设计、物理隔离、自动抑制系统)从根本上降低风险水平;对于中风险领域,可综合运用管理控制(如作业许可、程序优化)与行为控制(如培训、监督)手段;对于低风险项目,保持常规管理即可。差异化还体现在资源分配的优先级上——将有限的检测、维护、检查资源集中配置于高风险设备与关键保

护层^[4]。此外，应针对不同致因维度设计专项策略：人因维度侧重行为观察与绩效反馈，设备维度侧重基于状态的预测性维护，环境维度侧重气象联动与适应性调度，管理维度侧重体系审核与持续改进。

4 精准防控体系的实施保障

4.1 制度标准与组织保障

体系有效运行需要健全的制度环境支撑。企业层面应修订完善安全生产责任制，明确从董事长到一线员工的各级风险防控职责，并将履职情况纳入绩效考核。建立风险防控投入保障机制，确保风险评估、预警系统建设、人员培训等专项经费落实。组织架构方面，建议设置独立的风险管理委员会或首席安全官岗位，统筹协调精准防控工作推进。政府层面应加快制定危化行业精准防控相关技术标准，明确风险分级方法、预警阈值设定规则、差异化监管措施等技术要求，为企业实施提供规范依据。

4.2 技术平台与数据支撑

精准防控高度依赖数据驱动。企业应建设集成化的安全风险智慧管控平台，实现各类风险数据的统一采集、存储、处理与应用。数据来源包括：DCS/SIS过程数据、设备在线监测数据、环境气象数据、人员行为数据、隐患排查记录、事故事件库等。平台需具备数据清洗与质量校验功能，确保基础数据可信。在此基础上，开发风险态势感知与趋势预测算法模块，运用数字孪生技术构建虚拟工厂模型，支持“如果—怎样”情景推演。需特别关注数据安全与网络安全，防止控制系统因网络攻击失效。

4.3 人员能力与文化培育

再精密的系统最终需要人员操作与维护。应建立分层分类的精准防控能力培训体系：高层管理人员侧重风险战略认知与决策能力，技术人员侧重风险评估方法与数据分析技能，一线操作人员侧重风险辨识意识与应急处置能力。培训方式可结合虚拟现实（VR）技术开展沉浸式情景模拟，增强学习效果。更为根本的是安全文化建设——从“要我安全”向“我要安全”“我会安全”转变，鼓励员工主动报告未遂事件与安全隐患，建立非惩罚性报告机制，形成风险共担、防控共治的组织氛围。

4.4 运行评价与持续改进

建立科学的运行评价指标体系是推动体系持续优化的驱动机制。评价指标可分为过程指标与结果指标两类：过程指标包括风险评估覆盖率、预警系统完好率、隐患整改闭环率、计划培训完成率等；结果指标包括事故率、未遂事件数、监管处罚次数、体系审核得分等。定期开展内部审核与管理评审，识别体系运行中的薄弱环节。引入第三方机构进行独立评估，增强评价客观性。针对发现的问题，运用根源分析方法查找系统性缺陷，制定纠正与预防措施，形成“评价—反馈—改进”的正向循环。

5 结语

本文围绕危化行业安全风险防控问题，系统揭示了人因、设备、环境与管理四维度因素非线性耦合作用的致灾机理，指出单一维度管控难以根治事故，提出构建以风险精准辨识、评估、预警与管控为核心的防控体系，其实质是从经验驱动、粗放管理向数据驱动、差异化治理转型，并强调制度、技术与能力三者的协同保障，尤以数据平台为支撑、人员素养与安全文化为根基。研究虽具理论价值，但仍存局限：实证验证不足、风险耦合机制偏定性、细分行业差异未充分体现。未来应聚焦体系实证检验、人工智能赋能动态风险预测、引入韧性工程提升系统自适应能力，并开展跨行业比较，借鉴核电、航空等高可靠性领域经验。危化品安全是一场持久战，唯有坚持系统思维、数据驱动与持续改进，方能稳步提升本质安全水平，切实守护人民生命财产与社会和谐稳定。

参考文献

- [1]许兆星,王伟.危化品行业安全生产的智能监控与预警系统构建[J].智能制造研究与应用,2026,2(2):100-102+105.
- [2]黄岱昕,张立.严把源头提升工艺危化行业夯实安全基础[N].河南日报,2025-02-22(004).
- [3]付晶.浅谈化工行业中危化品的储存安全管理[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(17):74-76.
- [4]姜海燕.危化行业安全监管“运动式”治理机制效应分析[J].现代职业安全,2023,(5):100-103.