

天然气储运工程中的消防应急管理体系建设研究

后 磊 (中国石油化工股份有限公司储气库分公司, 河南 郑州 450001)

摘要: 在现实生活中, 天然气作为清洁能源在能源结构中占据重要地位, 但其易燃易爆特性决定了储运工程需建立完善的消防应急管理体系。本文从风险识别、法律框架、组织架构、技术支撑、培训演练、资源保障等维度, 系统构建了天然气储运工程消防应急管理体系, 提出以“一案三制”为核心、智能化技术为支撑、多方协同为保障的体系框架, 为行业安全发展提供理论支撑。

关键词: 天然气储运; 消防应急管理; 风险防控; 应急预案; 智能化技术

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 024-0136-03

Research on the Construction of Fire Emergency Management System in Natural Gas Storage and Transportation Engineering

Hou Lei (Sinopec Gas Storage Branch Company, ZhengZhou HeNan 450001, China)

Abstract: In real-life scenarios, natural gas, as a clean energy source, holds a significant position within the energy mix. However, due to its flammable and explosive nature, a comprehensive fire emergency management system must be established for storage and transportation engineering projects. This paper systematically constructs a fire emergency management system for natural gas storage and transportation engineering from multiple dimensions, including risk identification, legal frameworks, organizational structures, technological support, training and drills, and resource assurance. It proposes a system framework centered on the “One Plan and Three Systems” (a core emergency response plan supported by three institutional mechanisms), underpinned by intelligent technologies, and safeguarded by multi-party collaboration, thereby providing theoretical support for the safe development of the industry.

Keywords: natural gas storage and transportation; fire emergency management; risk prevention and control; emergency plan; intelligent technology

天然气作为清洁高效的能源, 其储运工程的安全运行直接关系到国家能源安全、公共安全与生态环境保护。近年来, 我国天然气消费量持续增长, 储运设施规模不断扩大, 但管道泄漏、储罐爆炸等安全事故仍时有发生, 暴露出消防应急管理体系仍存在短板。因此, 进一步研究天然气储运工程中的消防应急管理体系建设工作, 对于天然气的储运安全以及行业健康发展有着极为重要的意义。

1 天然气储运工程消防安全风险特征与挑战

1.1 储运设施的固有风险

天然气储运设施的固有风险源于其工艺特性与运行环境的复杂交互, 呈现多维度、系统性的安全挑战。从物质特性角度看, 天然气作为易燃易爆气体, 其与空气混合形成的爆炸性环境构成根本性威胁。储运设施需长期承受高压或低温工况, 比如 CNG 储罐需维持 20MPa 以上压力, LNG 储罐则需在 -162℃ 低温环境运行, 这种极端参数对材料性能提出严苛要求。金属材料在高压循环载荷作用下易产生疲劳裂纹, 低温环境则加剧钢材冷脆倾向, 若焊接缺陷或应力集中未被及时检测修复, 可能引发容器破裂事故。同时, 天然气中的硫化氢、二氧化碳等腐蚀性成分会加速管道内壁腐蚀, 在硫元素与氢元素共同作用下, 管材氢脆

风险显著升高, 导致局部减薄甚至穿孔泄漏。设施布局与运行逻辑进一步放大风险耦合效应。储运系统包含输送管道、储罐、压缩机等多元设备, 各环节通过阀门、法兰等连接件形成连续工艺链。单个组件失效可能引发连锁反应, 如压缩机故障导致压力异常波动, 既可能直接损坏设备本体, 又可能通过压力传递机制引发管道振动疲劳。除此之外, 储运设施与周边环境的动态交互形成潜在风险敞口。地下储气库受地质构造、地下水文条件制约, 地层不均匀沉降或腐蚀性地下水可能破坏井筒完整性; 地面设施则面临雷电、洪水等自然灾害威胁, 电气系统防爆失效或接地不良易产生点火源。

从系统安全视角审视, 储运设施的固有风险具有非线性演化特征。初期微小缺陷在长期正常使用过程中可能因腐蚀、磨损等机制逐步累积, 当突破临界阈值时突然释放能量。比如管道内壁点蚀坑在应力腐蚀作用下扩展为裂纹, 最终在压力波动或外力冲击下断裂, 这种风险潜伏性与突发性的矛盾, 要求安全管理体系具备前瞻性监测与动态干预能力。与此同时, 设施老化与新技术应用的双重压力加剧风险管控难度, 既有设备在超期服役状态下性能衰减, 而智能化改造引入的传感器、控制系统又可能带来新的网络攻击面,

形成传统风险与新兴风险交织的复杂局面。

1.2 现有消防管理体系的不足

现有天然气储运工程消防管理体系在应对复杂风险时暴露出多维度的结构性缺陷。从制度设计层面分析,现行规范体系存在滞后性与碎片化特征,多数标准仍聚焦于单一设备或工艺环节的安全阈值设定,缺乏对设施全生命周期风险耦合效应的动态评估机制。风险评估模型多采用线性叠加方法,难以准确刻画高压储罐疲劳损伤、管道腐蚀速率、地质沉降等参数的非线性交互作用,导致风险等级划分与实际威胁存在偏差。技术支撑体系存在代际差距,传统消防系统主要依赖固定式探测装置与手动报警装置,对微小泄漏、早期阴燃等前兆性征兆的识别能力不足,且缺乏基于物联网的实时监测网络与边缘计算能力,无法实现从数据采集到风险预警的闭环管理。应急响应机制存在断层,预案编制多采用“场景-措施”的静态映射模式,未充分考虑极端天气、地质灾害等外部扰动因素与设施故障的叠加效应,跨部门协同机制亦缺乏实战化磨合,导致资源调度效率与现场处置能力存在瓶颈^[1]。除此之外,工作人员能力建设滞后于技术演进,一线操作人员对智能监控系统的数据解析能力不足,应急指挥人员缺乏对数字技术、虚拟仿真等新型技术工具的应用经验,造成了“技术装备先进性与人员素养适配性”的结构性矛盾。并且,物资保障体系同样存在短板,专用消防装备配置标准未充分考虑高寒、高温、高腐蚀等极端环境适应性需求,应急物资储备布局与储运设施风险热力图存在空间错配,导致关键时刻装备可用性与响应时效性难以保障,这些缺陷共同构成制约消防管理体系效能提升的深层桎梏,亟需通过系统性重构实现从“被动应对”向“主动防御”的范式转变。

2 消防应急管理体系的核心框架构建

2.1 风险评估与预防机制

天然气储运工程消防应急管理体系的核心在于构建风险评估与预防机制,形成对潜在威胁的主动识别与前置干预能力。该机制需以多源数据融合为基础,整合设备运行参数、环境监测数据、地质构造信息等动态变量,通过机器学习算法建立风险演化模型,突破传统静态评估的局限性。模型应具备自适应学习能力,实时分析压力波动频率、腐蚀速率变化曲线等关键指标,结合设备服役周期与历史失效数据库,量化疲劳损伤累积效应与突发故障概率。在此基础上构建三维风险矩阵,横轴表征事故后果严重度,纵轴反映发生概率,第三维度引入社会影响系数与生态破坏指数,形成立体化风险画像^[2]。

预防机制需建立分级管控体系,针对高风险区域实施技术防护与物理隔离双重措施。采用纳米涂层技术提升管道耐腐蚀性能,部署光纤传感网络实现泄漏点亚米级定位,利用相控阵超声检测技术对焊接接头进行无损探伤。同时构建数字技术管理平台,对储罐热应力分布、管道振动模态进行仿真推演,提前识别结构失稳前兆。在管理层面推行预防性维护策略,基于风险评估结果动态调整检测周期,对服役中期设备实施加密巡检,对超期服役设施启动技术改造或退役流程。建立区域性风险联防机制,整合周边企业、消防部门、应急管理局的数据平台,通过边缘计算节点实现风险信息的实时共享与协同研判,确保在地质灾害预警或极端天气预报时,能够提前启动压力泄放、惰性气体置换等预防性操作,这种从数据采集到模型推演,再到干预决策的闭环体系,将风险管控由事后响应转向事前预防,显著提升消防安全的本质化水平。

2.2 应急预案体系优化

应急预案体系优化需突破传统静态文本模式,构建动态化、智能化的预案管理生态。其核心在于建立风险驱动型预案修订机制,将实时风险评估结果与预案响应等级动态关联,通过规则引擎自动触发预案升级或降级操作。预案内容需打破部门壁垒,采用模块化架构设计,将泄漏处置、火灾扑救、人员疏散等核心单元拆解为独立模块,各模块内置标准化接口与协同规则,确保跨部门响应时能够实现资源调配、信息共享、指挥权限的无缝衔接。预案智能化改造是优化关键,需集成大数据分析、AI预测模型等技术手段。基于历史事故数据训练的深度学习网络可对预案适用性进行动态评价,自动识别预案与新兴风险场景的匹配缺口。数字模拟技术支撑的预案推演系统,可模拟不同灾害场景下的设施响应特征与次生灾害链,通过参数化调整消防力量配置、隔离阀启闭时序等变量,生成多组优化方案并量化评估其效能边界^[3]。而在通信层面,需构建安全性极强的应急通信网络,采用自组织网状拓扑结构,确保在极端灾害导致公网瘫痪时,仍能通过专用频段维持指挥中枢与现场终端的可靠连接。预案培训体系需同步升级,运用VR/AR技术构建沉浸式训练环境,使操作人员能够在虚拟空间中反复演练泄漏封堵、关阀断料等高风险科目,系统通过动作捕捉与过程回放功能实现操作规范性量化评估。预案演练需向双盲模式转型,即不预设演练时间与事故场景,通过红蓝对抗机制检验指挥体系的临机决策能力。最终形成“监测-评估-修正-演练”的闭环优化机制,确保预案始终与设施风险状态、技术演进趋势、组织能力边界保持动态适配。

2.3 应急资源保障体系

应急资源保障体系是消防应急管理体系高效运作的物质基础与能力支撑,其构建需围绕“平战结合、快速响应、智能调配”原则展开。在物资储备层面,应建立三维储备网络,以中心库房为核心节点,区域分拨中心为支撑节点,移动式应急舱为末梢节点,形成梯次配置、功能互补的保障架构。储备品类需突破传统消防物资范畴,纳入高压密封组件、惰性气体发生装置、低温应急泵等专用设备,并依据设施风险等级实施差异化配置策略。采用物联网技术构建智能仓储系统,通过 RFID 标签与环境传感器实现物资状态实时监控,结合需求预测模型自动触发补货流程,确保关键物资始终处于最佳保质期^[4]。装备保障体系需突出技术先进性与环境适应性,重点配置多模态探测机器人、远程灭火炮等智能化装备,其防护等级需满足防爆、耐腐蚀、抗低温等复合要求。建立装备健康管理系统,通过振动分析、油液监测等技术手段预判设备故障,延长战备完好率。在人力资源方面,构建“专常兼备”的应急队伍结构,专职消防员需掌握数字孪生系统操作、危化品处置等专项技能,兼职人员则通过社会化协作机制纳入周边企业、社区力量,形成 15 分钟应急响应圈。技术支撑体系是资源保障的神经中枢,需整合卫星通信、区块链溯源、数字孪生推演等技术,构建应急资源一张图系统。该系统可实时显示物资库存、装备位置、人员状态等信息,通过智能算法生成最优调配方案,并在断网环境下自动切换至自组织网络模式。建立政企联动保障机制,与消防装备制造、物流企业签订应急协议,利用社会运力拓展资源投送渠道。最终形成“储-管-调-运”全链条智能化保障能力,确保在极端条件下仍能实现 4 小时内核心资源到位、24h 内全面恢复的保障目标。

3 天然气储运工程消防应急管理体系建设创新方向与对策建议

天然气储运工程消防应急管理体系建设需聚焦三大创新方向:技术融合创新、管理机制革新与生态协同进化。在技术维度,应加速数字技术与物理系统的深度融合,构建覆盖储罐应力场、管道流场、环境气象场的多尺度仿真平台,通过高精度模型实现事故演化路径的预测性推演。与此同时,研发基于量子传感技术的泄漏监测网络,利用其超灵敏特性捕捉 ppm 级浓度变化,结合无人机载高光谱成像设备,形成空地一体的早期预警体系。在管理机制层面,需建立风险共担的弹性治理模式,引入区块链技术构建去中心化的应急协作平台,实现政府监管部门、企业主体、第三方服务机构的数据互信与责任追溯。推行“智能合

约”机制,当监测数据突破预设阈值时自动触发应急响应流程,减少人为决策延迟。在生态协同方面,应打造产学研用协同创新共同体,联合高校、科研院所、装备制造开展关键技术攻关,如耐超低温消防机器人、自修复型阻燃材料等。建立区域性应急能力评估指数,将消防站布局密度、装备更新率、人员培训频次等指标纳入地方政府安全考核体系,形成政策引导与市场驱动的双重激励^[5]。最终构建“技术-管理-生态”三位一体的创新工作模式,推动消防应急管理从单点防控向系统韧性建设转变,从行业自律升级为全要素协同治理。

除此之外,在现实工作中,对于整体工作质量与效率的提升,相关管理人员还要重视专业人才培养以及专业梯队打造与管理工作。首先,对于专业人才培养与引进,相关管理人员应解放思想,一方面重视内部专业人才的培养与提升,深入挖掘有潜质的优秀人才通过专业技能培训,最新技术学习等方式进一步加强专业人才的综合实力。另一方面,相关管理人员还应积极开展高素质人才的外部招聘引进工作,通过制定更人性化的人才引进政策,吸引专业技能高素质人才的加入。其次,对于高素质人才梯队的打造与管理,相关工作管理人员应从更高角度考虑具体工作的执行,要以专业高素质人才为核心重点打造综合能力强的专业队伍,为天然气储运工作在未来的良性发展打下更坚实的基础。

4 总结

天然气储运工程消防应急管理体系建设是一项系统性工程,需从风险防控、预案优化、资源保障、技术创新等多维度协同推进,通过借鉴国际经验、强化政企协同、应用智能技术,可显著提升我国天然气储运工程的安全水平,为能源转型与高质量发展提供坚实保障。未来,随着氢能等新能源的融入,消防应急管理体系还需持续迭代,以适应新型能源体系的安全需求。

参考文献:

- [1] 魏洁, 乔小伟. 液化天然气储运安全技术和管理措施 [J]. 山东化工, 2024, 53(01): 235-237.
- [2] 刘华. 石油天然气管道储运的安全管理探讨 [J]. 石化技术, 2023, 30(08): 135-137.
- [3] 赵玖超, 何倩, 嵇斌华, 高炳伟. 液化天然气储运风险因素及策略 [J]. 化工管理, 2023, (15): 105-107.
- [4] 韩志国. 液化天然气的储运问题与安全技术管理 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(21): 82-84.
- [5] 张玉龙. 油气储运火灾事故应急过程致因因素评估及预防 [D]. 大连: 大连海事大学, 2021.