

化工储运环节的安全风险控制与监测技术应用

薛 俊

山西焦化股份有限公司 山西 临汾 041600

摘 要: 化工储运作为连接生产与消费的关键纽带,其安全状况直接关系到人民生命财产、生态环境乃至社会公共安全。由于所涉物料普遍具有易燃、易爆、有毒、有害及腐蚀性等固有危险特性,加之工艺复杂、设备密集、环境多变等因素,使得该环节成为化工行业事故的高发区和重灾区。本文系统阐述了化工储运环节面临的主要安全风险类型及其深层成因,全面梳理了以传感器网络、在线分析、无损检测为核心的现代安全监测技术体系,并深入探讨了涵盖本质安全设计、过程安全管理(PSM)、人员行为规范及应急响应在内的多层次风险控制策略。在此基础上,文章重点剖析了人工智能、大数据、数字孪生等新一代信息技术驱动下,化工储运安全监测与风险管控向智能化、预测化、协同化发展的前沿趋势。研究表明,构建“人-机-物-法”深度融合的智慧安全新范式,是实现化工储运本质安全的根本路径。

关键词: 化工储运;安全风险;风险控制;监测技术;智能化;发展趋势

引言

化学工业作为国民经济的重要支柱,为农业、医药、材料和能源等领域提供基础原料,但其在创造经济价值的同时,也伴随显著的安全风险,尤以储运环节最为突出。化工储运涵盖厂内储存、管道输送及铁路、公路、水路运输与装卸作业,具有高度动态性与开放性——危险化学品在不同设施与载体间频繁流转,暴露于复杂外部环境中,微小失误极易引发连锁性灾难。天津港“8·12”瑞海公司爆炸、江苏响水“3·21”天嘉宜化工事故等重大事件,深刻揭示了该环节在风险辨识、过程管控和应急响应等方面的系统性短板,不仅造成惨重人员伤亡和财产损失,更对生态环境与社会稳定产生长期负面影响。面对严峻形势,国家持续强化法规标准体系,《安全生产法》《危险化学品安全管理条例》相继修订,《化工过程安全管理导则》(AQ/T 3034)等标准深入实施,对化工储运安全提出更高、更精细化的要求。传统依赖人工巡检和经验判断的管理模式已难以满足现代化大规模、连续化、智能化生产的需求。在此背景下,推动安全治理模式向技术驱动转型势在必行:一方面需发展高精度、实时化的泄漏监测、气体传感与智能预警技术;另一方面应构建覆盖全链条的风险评估、过程控制与应急响应体系,并深度融合物联网、大数据与人工智能,实现储运全过程的可视化、可预测与自主决策。唯有通过技术创新与管理升级双轮驱动,才能切实提升化工储运的本质安全水平,为行业高质量发展筑牢安全基石。

1 化工储运环节的主要安全风险类型与成因

化工储运环节的安全风险是一个复杂的系统工程问题,其来源多样、相互交织,可归纳为物料固有风险、设备设施风险、操作管理风险及外部环境风险四大类。

1.1 物料固有风险

化工储运的核心对象是各类危险化学品,其内在的物理化学性质构成了最根本的安全风险源。首先,易燃易爆性是许多有机溶剂、液化石油气、氢气等物料的共性,一旦泄漏并与空气混合达到爆炸极限,在遇到点火源(如明火、静电火花、高温表面)时极易发生火灾或爆炸。其次,毒性与腐蚀性风险同样突出,如氯气、氨气、硫酸、氢氧化钠等物质,即使少量泄漏也可能通过吸入、皮肤接触等途径对人体造成急性或慢性伤害,并对周边设备和建筑结构产生腐蚀破坏。此外,部分化学品还具有自燃性(如黄磷)、遇湿反应性(如金属钠)或聚合放热性(如丙烯酸),这些特殊的理化性质进一步增加了储运过程中的不确定性和危险性^[1]。物料的风险不仅体现在其单一组分上,当多种不相容的化学品因管理不当而混存混放时,可能发生剧烈的化学反应,释放大热量和有毒气体,导致事态急剧恶化。

1.2 设备设施风险

储运系统的硬件设施是承载危险物料的物理屏障,其完整性与可靠性直接决定了安全底线。储罐、管道、阀门、泵、装卸臂等设备在长期运行中,会受到内部介质的腐蚀、冲刷以及外部环境(如温度变化、紫外线

照射、机械应力)的影响,导致材料性能退化,出现壁厚减薄、裂纹、穿孔等缺陷,从而引发泄漏。密封失效是另一大常见风险点,无论是动密封(如泵的轴封)还是静密封(如法兰垫片),一旦失效,都会成为 VOCs 逸散和物料泄漏的直接通道。此外,安全附件的失灵也会带来严重后果,例如呼吸阀堵塞可能导致储罐在进料时超压破裂,或在出料时形成负压被抽瘪;紧急切断阀(ESD)若在关键时刻无法动作,则会使泄漏事故失去第一时间的控制机会。设备的设计缺陷、制造瑕疵或安装不当,同样是潜在的重大隐患。

1.3 操作管理风险

人为因素和管理体系的缺陷是导致事故发生的另一重要维度。操作人员的违章作业,如未按规程进行装卸操作、擅自更改工艺参数、在禁火区违规动火等,往往是点燃事故的直接导火索。这背后反映出的是安全培训不到位、安全意识淡薄以及安全文化缺失等问题。管理层面的风险则更为隐蔽和系统化,包括但不限于:安全管理制度不健全或执行流于形式;风险辨识与评估工作不深入,未能全面覆盖所有作业活动和设备设施;变更管理(MOC)程序缺失,对工艺、设备、物料的任何变更未能进行充分的风险评估;承包商管理松懈,对外来施工人员缺乏有效监管;以及应急预案演练不足,导致事故发生时响应混乱、处置不当。这些管理上的漏洞,使得再先进的硬件设施也难以发挥应有的安全保障作用。

1.4 外部环境风险

化工储运设施并非孤立存在,其安全还受到外部环境的深刻影响。极端天气事件,如雷击、暴雨、洪水、台风、高温或极寒,都可能对储运系统构成威胁。雷击可能引燃可燃蒸气云,暴雨和洪水可能导致厂区积水,淹没电气设备或使储罐浮起,高温则会加剧物料的挥发和储罐的“小呼吸”损耗。此外,来自外部的机械损伤也不容忽视,例如车辆碰撞装卸设施、船舶靠泊时撞击码头管线、或周边施工活动对地下管道造成破坏等。这些外部扰动因素往往具有突发性和不可预测性,对储运系统的韧性提出了严峻考验。

2 化工储运环节的安全监测技术体系

面对上述复杂多元的安全风险,建立一套全面、实时、精准的监测技术体系是实现风险早期预警和主动防控的前提。现代化工储运安全监测已从单一参数的离散测量,发展为集传感、通信、计算于一体的综合感知网络。

2.1 基于传感器网络的实时状态监测

传感器是安全监测系统的“神经末梢”,负责采集各类关键参数。在化工储运领域,已广泛应用多种类型的传感器构建全方位的监测网络。可燃气体和有毒气体探测器(如催化燃烧式、红外式、电化学式)被战略性地部署在储罐区、泵房、装卸栈台等潜在泄漏点周围,用于实时监测空气中危险物质的浓度,并在超标时发出声光报警^[2]。温度和压力传感器则直接安装在储罐本体、管道及关键设备上,持续监控其运行状态,防止超温超压等危险工况的发生。液位计(如雷达式、伺服式、磁致伸缩式)能够精确测量储罐内物料的存量,不仅是生产计量的依据,也是防止冒罐或抽空的重要安全连锁信号。此外,火焰探测器、烟雾探测器、视频监控摄像头等也被广泛用于火灾的早期探测和现场态势感知。这些传感器通过有线或无线方式接入中央控制系统,实现了对储运设施全域、全时的数字化感知。

2.2 在线分析与泄漏检测技术

对于一些特定场景,常规的点式传感器可能难以满足需求,此时需要借助更为专业的在线分析与泄漏检测技术。气相色谱(GC)或质谱(MS)等在线分析仪可以对工艺气流或环境空气进行连续采样分析,精确识别和定量其中的多种组分,适用于对成分复杂的混合物进行监控。针对长输管道的泄漏检测,业界发展了多种基于模型或信号处理的方法,如负压波法、流量平衡法、光纤分布式声学传感(DAS)技术等。DAS 技术尤为先进,它利用铺设在管道沿线的通信光缆作为传感器,能够感知由泄漏产生的微弱声波或振动,并精确定位泄漏点,灵敏度高、覆盖范围广。对于储罐底部或埋地管线的微小渗漏,土壤湿度传感器、地下水监测井以及示踪剂技术等也能提供有效的监测手段。

2.3 设备完整性无损检测技术

为了预防因设备老化或损伤导致的突发性失效,定期或在线的无损检测(NDT)至关重要。超声波测厚(UT)是最常用的手段之一,通过测量超声波在材料中的传播时间来精确计算壁厚,从而评估腐蚀程度。射线检测(RT)和渗透检测(PT)则能有效发现焊缝或表面的裂纹、气孔等缺陷。近年来,导波检测(Guided Wave Testing, GWT)技术因其能够对长距离管道进行快速筛查而备受关注^[3]。更前沿的技术如基于声发射(AE)的在线监测,可以在设备运行状态下捕捉到由裂纹扩展或泄漏产生的瞬态弹性波,实现对设备健康状态的实时评估。这些无损检测技术为制定科学的设备维护和更新计

划提供了坚实的数据支撑。

3 化工储运环节的安全风险控制策略

有效的监测是基础,而系统化的风险控制策略则是将风险降至可接受水平的关键。这要求从设计源头到日常运营,构建一个多层次、纵深防御的安全管理体系。

3.1 本质安全设计与工程控制

风险控制的最高境界是消除或替代,即在设计阶段就将风险降至最低,这被称为“本质安全”。在化工储运领域,这意味着优先选用危险性更低的物料或工艺路线。当无法避免使用高危物料时,则应通过工程措施进行隔离和控制。例如,采用密闭的装卸系统(如鹤管)代替敞口操作,从根本上减少物料与大气的接触;设置围堰或防火堤,将单个储罐的泄漏事故限制在局部范围内,防止流淌火蔓延;在关键部位安装紧急切断阀(ESD)和安全泄放装置(如爆破片、安全阀),作为防止事态扩大的最后一道物理屏障。此外,合理的总图布置,确保各功能区之间有足够的间距,也是重要的工程控制措施。

3.2 过程安全管理体系(PSM)

如果说工程控制是硬件保障,那么过程安全管理体系(Process Safety Management, PSM)就是软件核心。PSM是一套系统化的管理方法,旨在识别、评估和控制与危险化学品相关的重大风险。其核心要素包括:工艺安全信息(PSI)的完整收集与管理;工艺危害分析(PHA),如HAZOP(危险与可操作性研究)或LOPA(保护层分析),用于系统性地识别潜在危害并评估现有保护措施的有效性;操作规程的制定与严格执行;设备的机械完整性管理(MI);承包商管理;启动前安全审查(PSSR);以及事故调查与经验反馈等^[4]。通过全面落实PSM的各项要素,可以将安全管理融入到企业的每一个业务流程中,形成一种主动预防而非被动响应的安全文化。

3.3 人员行为规范与应急管理

再完善的硬件和制度,最终都需要人来执行。因此,强化人员的安全意识和技能是风险控制不可或缺的一环。这包括对所有员工进行严格、持续的安全培

训,使其充分了解所处理物料的危害、掌握正确的操作规程和应急处置方法。推行标准化作业(SOP)和作业许可制度(如动火、受限空间、高处作业许可),可以有效规范高风险作业行为。同时,建立健全的应急管理体系至关重要。这要求企业根据风险评估结果,制定针对性强、可操作的应急预案,并配备必要的应急物资和装备。更重要的是,要定期组织不同层级、不同规模的应急演练,检验预案的有效性,锻炼应急队伍的实战能力,确保在真实事故发生时能够迅速、有序、高效地进行响应,最大限度地减少损失。

4 结语

化工储运环节的安全风险控制是一项复杂的系统工程,需要技术、管理和文化的协同发力。本文系统梳理了该环节面临的主要风险类型,并详细阐述了从实时监测、在线分析到无损检测的现代技术体系,以及涵盖本质安全、过程安全管理和应急管理的多层次控制策略。研究表明,单纯依赖某一种技术或管理手段都无法从根本上解决安全问题。展望未来,化工储运安全的发展方向必然是智能化、数字化和一体化。以AI、大数据、数字孪生等技术为引擎,推动安全管理模式从“人防+技防”的被动响应,向“智慧防控”的主动预测和精准干预跃迁,是实现本质安全的必由之路。这不仅要求企业加大在新技术上的投入,更需要培养既懂化工工艺又精通信息技术的复合型人才,并构建与之相适应的新型安全文化。唯有如此,才能在保障化工行业高效运转的同时,筑牢守护人民生命财产和生态环境的坚固防线,为行业的可持续发展保驾护航。

参考文献

- [1] 雪生谋. 化工企业储运过程安全管理策略[J]. 中国石油和化工标准与质量,2026,46(07):49-51.
- [2] 卢玉章, 栾剑锋, 纪斌. 大型化工储运罐区安全管理优化的研究[J]. 中国化工贸易,2026,18(05):144-146.
- [3] 陈绪爱. 化工储运安全标准化管理体系建设与评价研究[J]. 中国化工贸易,2026,18(05):123-125.
- [4] 戴永生. 化工物料安全储运的风险识别与管控策略研究[J]. 中国轮胎资源综合利用,2025,(11):159-161.