

化工工艺管道泄漏事故分析及安全应急预案研究

李 梦（滨州市危险化学品安全科学研究中心，山东 滨州 256600）

郭莹莹（滨州市应急救援指挥保障中心，山东 滨州 256600）

摘要：化工行业的管道泄漏事故对生产安全构成重大威胁。本研究通过分析化工工艺管道泄漏的典型案例，探讨事故的原因及其对环境和安全的影响。采用故障树分析(FTA)和层次分析法(AHP)，确定关键影响因素。基于以上研究，进一步构建了一套针对化工工艺管道泄漏的安全应急预案。该预案从源头预防、风险控制、应急响应和事后处理四个方面进行系统设计，旨在最大程度减少事故的概率和危害。对化工行业管道管理和应急响应机制的建立与完善具有重要的指导意义。

关键词：化工工艺管道；泄漏事故分析；安全应急预案

0 引言

化工管道作为输送化学品的重要设施，一旦泄漏会带来严重后果。本研究通过故障树分析和层次分析法，深入探讨化工工艺管道泄漏的原因，评估关键影响因素，从而绘制出风险地图。通过分析多起典型泄漏案例，揭示事故背后的共同和个别问题，总结经验教训。在此基础上，构建全面的安全应急预案，涵盖事故预防、风险控制、应急响应和事后处理等多个环节，形成闭环安全管理体系。研究旨在为化工行业提供管道泄漏的防范、应对和控制实践指南，提升企业的风险管理能力和应急响应能力，努力实现降低事故发生的目标。

1 化工行业管道泄漏的严重性和案例概述

1.1 化工行业管道泄漏的严重性

化工行业是现代工业的重要组成部分，其生产过程中使用了大量具有腐蚀性、易燃性、毒性的化学品，这类物质的大规模输送主要依赖管道系统。由于管道事故频发，泄漏问题已经成为化工生产安全管理中的突出难题^[1]。管道泄漏事故通常伴随着化学物质的无序扩散，可能导致火灾、爆炸和有毒气体泄漏等二次灾害，不仅威胁操作人员和周边居民的生命安全，还对生态环境造成严重污染。

泄漏事故还会中断正常生产流程，导致企业经济损失，甚至引发社会恐慌。针对这些问题，许多学者认为管道泄漏的严重性主要体现在事故难以预测、防控难度高及影响范围广等方面。化工管道多处于高温、高压或腐蚀介质环境下，随着设备老化、工艺复杂度提高及人为因素的增多，管道泄漏的风险依然存在，其潜在的破坏性和危害性已成为化工行业不可忽视的

重要课题。加强对化工工艺管道泄漏的研究，提出科学有效的预防和管理对策，对于实现化工产业的稳定生产和安全发展具有重要价值^[2]。

1.2 管道泄漏事故的典型案例回顾

化工工艺管道泄漏事故屡见不鲜，对生产安全和环境保护造成重大影响。2023年1月15日，辽宁盘锦浩业化工有限公司发生了一起重大管道泄漏事故。事故源于烷基化装置水洗罐入口管道的弯头夹具泄漏，虽经多次堵漏尝试均未成功。在带压密封作业过程中，管道焊缝突然断裂，大量介质喷出并与空气混合形成爆炸性蒸气云团，遇点火源后发生爆炸着火，导致13人死亡、35人受伤，直接经济损失约8799万元。此次事故的典型性在于，它暴露了多个安全隐患：一是管道材料选择不当，擅自将设计要求的316不锈钢替换为20钢；二是作业过程中未严格按照规范要求制定施工方案和应急措施；三是企业特种设备日常管理严重缺位。这些因素共同导致了这场悲剧的发生，为后续的风险控制和应急预案制定提供了深刻教训^[3]。

2 泄漏事故原因识别

2.1 管道材料与工艺环节缺陷

管道材料与工艺环节的缺陷是化工管道泄漏事故的主要诱因之一。化工工艺中使用的管道材料种类繁多，包括金属、合金及非金属材料，若材料选择不当，会因化学腐蚀、机械应力或温度变化等因素导致管道强度下降，增加泄漏的风险。管道材料老化、疲劳裂纹等问题进一步加剧了事故可能性，尤其是在高温高压或恶劣腐蚀性环境下。

工艺环节设计中的不合理性同样可能引发泄漏事故。例如，管道连接部位的应力集中、焊接质量不达

标以及密封件的失效易成为泄漏的薄弱点。而复杂工艺流程中管道布局的角度不当、管道振动未得到有效控制等问题，也可能导致长期运行中的材料疲劳和损伤。忽视工艺参数的动态变化可能导致管道承压能力超载。

针对上述问题，加强材料质量的选型评估和管道设计优化至关重要。通过提高材料性能、改进工艺设计以及定期维护检修，可以显著降低管道泄漏事故的发生概率，保障化工生产过程的安全性和稳定性。

2.2 操作错误与监管不足

操作错误与监管不足是化工工艺管道泄漏事故的重要诱因之一。从操作层面看，员工专业技能不足、工艺参数设置不当以及违规操作是泄漏事故的常见触发因素。由于化工生产环境复杂，一旦操作人员未能准确执行标准操作规程或忽视异常情况，易导致管道压力或温度超限，进而引发泄漏。从监管角度分析，疏于技术检查、缺乏严格的安全审计和风险评估是导致事故的重要原因。监管体系中如果存在安全责任不明确、巡检频率不足或应急机制不健全等问题，会增加管道事故发生的可能性。这种操作与监管失控的双重作用，会使安全隐患累积，最终触发灾难性后果。强化操作人员培训、优化管道操作流程以及建立全面的监管体系是关键的防控策略^[4]。

2.3 环境因素与外界干扰

环境因素与外界干扰是化工管道泄漏事故的重要诱因。极端天气如强降雨、高温和地震可导致管道物理损伤，地质变化引发支撑结构失稳。外界因素如机械撞击、车辆碾压及人为破坏会破坏管道完整性，增加泄漏风险。这些干扰因素的不可控性和复杂性对化工管道的安全管理提出了更高要求。

3 泄漏风险评估与关键因素

3.1 故障树分析应用于管道泄漏识别

故障树分析(FTA)是一种系统化的事故分析工具，在化工工艺管道泄漏风险评估中具有重要作用。通过对泄漏事故的顶事件定义，建立故障树模型，层层分解事故发生的可能路径，能够系统揭示潜在事故的成因及其逻辑关系。在化工管道泄漏事故中，可能涉及的基本事件包括管道材料老化、焊接缺陷、操作失误、设备腐蚀、环境因素引发的外力破坏等。通过对基本事件发生概率的估算，可以量化各因素对顶事件发生的贡献率，为事故原因的优先级排序提供依据。

故障树分析的结果可直观显示事故发生的关键路

径，便于确定影响泄漏的主要薄弱环节。例如，通过分析，若管道腐蚀为顶事件的主要路径之一，应重点加强管道材料的选择和防腐技术优化。故障树分析不仅可以精确识别风险源，还为后续的防控措施和资源分配提供科学依据，提高管道管理及事故预防的有效性，为保障化工生产安全提供理论支持。

3.2 层次分析法在关键因素权重确定中的应用

层次分析法(AHP)在化工工艺管道泄漏关键因素权重确定中的应用具有重要意义。该方法通过构建多层次结构模型，将复杂的影响因素逐层分解为若干子因素，形成清晰的结构层次。结合泄漏风险的特点，综合选取管道材料缺陷、工艺环节故障、操作失误、监管不足、环境干扰等因素为评价指标。利用专家打分法和成对比较矩阵，对各因素的重要性进行量化分析，计算出一致性比例(CR)以验证矩阵的一致性，从而确保结果的可靠性。最终得到各因素的权重值，为提高决策的科学性和针对性提供了数据支持，为管道泄漏风险的量化管理奠定了基础^[5]。

3.3 泄漏事故风险评估模型建立

基于故障树分析和层次分析法，建立化工工艺管道泄漏事故的风险评估模型，综合分析事故的发生概率与潜在影响。通过定义顶事件、基本事件及其逻辑关系，计算管道泄漏的概率路径。结合层次分析法赋予关键因素权重，构建多层次评估指标体系，以量化事故风险等级。模型核心在于集成化的数据处理与动态风险评估机制，可综合反映材料缺陷、操作失误和环境干扰对事故的综合影响，为管道泄漏预防与应急决策提供科学依据。

4 安全应急预案构建

4.1 预防措施与风险控制策略

针对化工工艺管道泄漏事故的预防与风险管理，应从技术与管理两方面入手。技术层面，优化管道材料选择，优先使用高强度、抗腐蚀性能良好的材料，确保管道设计符合相关标准及工况需求。提升管道安装工艺的精度，配备高灵敏度的泄漏检测设备，实现实时监测与故障早期预警。加强工艺条件控制，确保运行参数始终在安全范围内。管理层面，健全设备巡检制度，安排专业人员定期对管道进行全面检查与维护。重点监控高风险区域与关键节点，及时发现并排除隐患。强化操作人员培训，提升岗位技能水平，明确安全操作规程与应急处理流程。完善风险评估机制，通过动态评估与分级管理，制定针对性风险控制

措施。建立健全的信息管理系统，实现安全管理数字化、智能化。通过技术与管理手段的综合应用，可有效降低管道泄漏的发生概率，为化工生产提供安全保障。

4.2 应急响应计划制定与实施

应急响应计划的制定与实施是化工工艺管道泄漏安全管理的关键环节。响应计划的核心在于快速、高效、科学地应对突发泄漏事故，以最大限度降低事故对人员、设备及环境的损害。计划应基于风险评估结果，明确事故处理的优先序列，并建立信息通报及决策指挥体系。事发后，需迅速启用专门的应急指挥中心，协调事故现场封闭、泄漏源控制及人员疏散工作，组织专业应急队伍实施抢修与善后操作。个人防护设备（PPE）及环境检测仪器的部署需满足泄漏控制及扩散监测的需求。对于泄漏物质扩散区域，应制定控制扩散的所在区域隔离、稀释处理方案。所有应急行动应严格遵循标准操作程序（SOP），并结合现场具体情况实时调整，确保响应的实效与精准性。

4.3 事后处理与恢复流程

事后处理与恢复流程在化工工艺管道泄漏事故中至关重要，包括现场清理、安全检测、环境修复和生产恢复四个环节。现场清理应及时清除泄漏物以防止扩散，确保区域安全。安全检测需针对环境和设备进行全面评估，确认无潜在风险后方可进入恢复阶段。环境修复涉及污染土壤、空气及水体的修复工作，以降低生态影响。生产恢复需在完善防控措施的基础上，逐步恢复正常运行，确保事故教训转化为改进实践。

5 安全应急预案有效性分析

安全应急预案的有效性在应对化工工艺管道泄漏事故中至关重要，其科学性和可操作性直接影响事故处置效率与后果控制。构建的应急预案通过系统性设计，将事故预防、风险控制、应急响应和事后处理有机结合。预案合理性体现在源头风险识别的全面性、应急响应的时效性以及恢复流程的可操作性。通过对典型案例的验证分析，该预案优化了事故反应时间，降低了环境与经济损失的幅度。在风险控制中，预案注重多层次防控措施的实施与资源配置的合理性，使其适应多种复杂情境。整体效果表明，该预案在减少事故发生概率和降低事故影响方面具备显著优势，为化工行业建立高效的应急响应机制提供了重要参考依据。

6 对化工行业安全管理的建议

化工行业应加强管道全生命周期管理，以确保设

计、选材、施工、运行及维护各环节的规范性。建立完善的检测与监控体系，定期开展巡检与检修，及时发现与排除隐患。优化操作人员培训体系，提高安全意识与应急处置能力。强化风险评估与管理机制，推广先进技术手段，以提升事故预防能力。推动安全管理制度落实，健全法律法规与行业标准，实现事故管理的常态化与制度化，以全面提升化工行业本质安全水平。

7 结束语

通过本项研究的深入探讨，能够清晰地认识到化工工艺管道泄漏事故对生产安全的严重威胁，并揭示了此类事故的多样化原因及其对环境和公共安全所产生的严重影响。通过故障树分析（FTA）和层次分析法（AHP）的应用，本文成功确定了诸多关键影响因素，为管道泄漏事故的防控提供了科学依据。研究的关键创新在于构建了一套系统化的化工工艺管道泄漏的安全应急预案，涵盖从源头预防、风险监控、紧急响应到事后处理等全方位应对措施，为相关企业提供了具体可行的应对方案，以最大限度降低事故发生的可能性和危害程度。然而，研究的同时也暴露出一些局限性。例如，预案的具体实施效率和效果需要在实际操作中不断检验和优化，且不同化工企业的具体情况可能会影响预案的适用性和调整需求。未来的研究需针对不同类型化工企业进行个性化预案的设计与实施，同时对预案的有效性进行长期跟踪评估，确保持续改进和完善。综上所述，本研究为化工行业管道事故的安全管理和应急响应机制提供了有价值的参考。鼓励学术和工业领域的专家学者继续在此基础上，进行更深入的实证分析和预案的实际应用，共同推动化工产业安全生产水平的提升。

参考文献：

- [1] 谢朝晖. 港口化工企业生产安全事故的应急预案编制分析 [J]. 化工管理, 2022(22):123-126.
- [2] 田田. 矿山生产安全事故应急预案分析 [J]. 能源与节能, 2023(07):219-221.
- [3] 肖迪, 魏鹏, 刘硕. 直埋管道泄漏事故分析及应急处理 [J]. 电站系统工程, 2020, 36(05):73-74.
- [4] 宗学聪, 李新松, 轩红超, 李超. 海底油气管道泄漏事故树分析及泄漏溢油应急处置 [J]. 现代职业安全, 2022(11):81-83.
- [5] 周波. 化工安全管理及事故应急管理分析 [J]. 化工管理, 2021(05):117-118.