

化工管道安全运行中的风险评估与经济效益分析

陈姗姗 (肥东县应急管理局, 安徽 合肥 231600)

摘要: 化工管道作为物料输送的重要通道, 其安全运行关系到企业生产的稳定与人员财产安全。随着工艺复杂度和自动化水平的提升, 管道系统所面临的风险因素也趋于多样。本文从设备缺陷、操作失误及外部环境等方面识别关键风险, 结合风险矩阵与 HAZOP 分析等方法构建评估模型, 并提出了切实可行的风险控制策略。通过对安全管理投入与经济效益的定量分析, 结果表明科学的风险控制不仅有效预防事故发生, 还能提升运行效率, 带来显著的经济回报。

关键词: 化工管道; 安全运行; 风险评估; 经济效益; 隐患识别

中图分类号: TQ055.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 027-0142-03

Risk assessment and economic benefit analysis in the safe operation of chemical pipeline

Chen Shanshan (Feidong County Emergency Management Bureau, Hefei Anhui 231600, China)

Abstract: As an important channel of material transportation, the safe operation of chemical pipeline is related to the stability of enterprise production and the safety of personnel and property. With the improvement of process complexity and automation level, the risk factors faced by pipeline systems tend to be diverse. This paper identifies the key risks from the equipment defects, operation errors and external environment, constructs the evaluation model by combining the risk matrix and HAZOP analysis, and proposes a feasible risk control strategy.

Key words: chemical pipeline; safe operation; risk assessment; economic benefit; hidden danger identification

化工行业具有高温、高压、易燃、易爆等工艺特点, 管道系统作为物料输送的重要通道, 其安全运行对企业整体安全至关重要。近年来, 因管道老化、腐蚀、操作不当或外力破坏引发的事故频发, 暴露出部分企业在风险识别与控制方面存在薄弱环节。同时, 一些企业在安全投入上缺乏系统评估与效益分析, 难以形成科学的管理机制。针对这一问题, 从系统角度开展风险评估并分析安全管理的经济回报, 对于提升企业本质安全水平和实现效益最大化具有重要意义。

1 化工管道运行中风险因素的识别与分类

1.1 设备风险因素

化工管道长期处于高温、高压、强腐蚀介质的工作环境中, 设备本身的缺陷是安全运行的核心隐患。常见材料如碳钢、不锈钢 (304、316L) 虽具备一定耐腐蚀性能, 但在高氯化物、强酸或高温状态下易发生点蚀、应力腐蚀开裂等问题。部分老旧装置中仍采用 20# 钢、Q235-B 等普通碳钢, 易在高压输送苯类、有机胺等介质中出现胀裂。此外, 设计阶段若未考虑应力集中、热膨胀补偿等问题, 将导致运行中管道因支撑设置不当、热变形过大而出现焊缝开裂、法兰泄漏等失效现象。施工过程中若管件焊接不合规、热处理不到位, 也易形成内部缺陷, 埋下运行隐患。

1.2 操作与管理风险因素

管道系统运行中存在大量依赖操作人员的行为性

风险。典型问题包括违规操作阀门导致瞬时超压, 未按规定进行系统吹扫与置换引发可燃气体聚集, 或在设备未完全降温、泄压条件下盲目拆卸管件, 导致事故发生。此外, 管道巡检频率低、制度执行不到位, 也增加了隐患未被及时发现的可能性。某些企业在运行记录上存在数据造假、操作记录缺失等管理漏洞, 导致无法追溯事故根源。应急响应方面, 如未配置符合化工企业应急管理的预案, 或员工缺乏有效培训, 将在事故初期处理环节大幅加剧损失。

1.3 环境与外部风险因素

外部环境因素亦是化工管道运行中的重要风险来源。极端气候如暴雨、冰冻、强风或高温干旱可能导致支架沉降、管道热胀冷缩失衡, 进而引发固定点断裂或滑移。此外, 部分化工企业建设于地质活动带, 易受地震、地面沉降影响, 埋地管道可能发生接口错位或断裂。第三方施工风险亦不可忽视, 常见如城市管网改造期间误伤地下化工输送管道, 若未提前查明管道走向、未设置警示标志, 极易引发重大次生事故。管道布置与防护距离不合理也可能因火源、爆炸波及其他设施, 形成连锁效应。

1.4 典型事故案例分析

在实际生产中, 化工管道泄漏引发的安全事故屡有发生, 且多具有突发性强、危害范围广的特点。某化工企业在物料输送过程中, 因输送氯甲烷的管道发

生泄漏，引发爆炸事故，造成多名工作人员伤亡及设备严重损毁。事故调查表明，该段管道已连续运行多年，长期处于高腐蚀性介质环境中，但企业未建立定期的无损检测制度，导致管壁腐蚀严重、强度下降，最终因局部破裂导致事故发生，属于设备风险长期积累未被识别和处置的典型表现。

2 化工管道风险评估方法与实施策略

2.1 常用风险评估模型介绍

在化工管道系统的安全管理中，选择合适的风险评估模型需综合考虑介质特性、工艺复杂度和系统结构。风险矩阵法因其直观简便，常用于中小型生产线的初步评估，通过概率与后果构建二维矩阵划分风险等级。例如，有企业在原料管网评估中采用该方法识别出多个高风险点。故障树分析法（FTA）通过逻辑推演回溯事故致因，适用于识别复杂系统的潜在故障路径，如某企业通过 FTA 识别出丙烯管线存在由操作失误与设备老化叠加导致的风险。HAZOP 分析以工艺参数“偏离”为核心，适用于流程连续性强的系统。例如，某厂在分析过程中发现冷凝器压差异常，经调整有效避免了系统回流破裂问题。对于风险因素众多且相互作用复杂的系统，也可采用层次分析法（AHP）与模糊综合评价模型，定量评估各因素权重，提升风险识别的系统性和科学性。

2.2 管道系统风险评估流程

一个完整的化工管道风险评估过程通常包括四个关键阶段：风险识别、风险分析、风险评价与控制对策制定。

在第一阶段，企业需收集设备使用年限、介质理化性质、周边区域条件、历史检修记录等基础信息，全面识别可能影响系统稳定性的风险源。例如，在对一条多介质输送管道的巡检中，通过对现场工况与历史泄漏数据的对比分析，发现中间换热段存在隐蔽性腐蚀风险。

第二阶段则通过半定量或定量方法对每一项风险进行评估，可借助数学模型、专家打分或基于设备失效数据进行统计分析，从而计算风险值。例如，一家企业基于近三年的泄漏事故记录，构建了概率-影响评分系统，对其老化碳钢管线进行优先级排序。

第三阶段根据计算结果对风险进行分级，一些企业设定内部风险控制阈值，将综合得分超过一定比例的管段列入预警目录。最后，制定包括材料更换、检测频次调整、工艺参数优化等在内的控制对策，从而将风险控制在可接受范围内。

2.3 评估结果的应用与风险等级划分

风险评估的最终目的是将评估结果有效应用于管

道系统的运行管理中，形成风险管理的闭环机制。企业应建立专门的风险档案数据库，对评估结果进行动态维护，将其与设备台账、维修计划、安全巡检制度等管理工具有机结合。例如，在某精细化工生产车间，运行风险等级为“高”的管段被明确标识并纳入重点监控清单，日常运维中要求现场人员每班次进行两次手动巡查，并由技术人员每月开展一次状态诊断。中风险等级的管道则加装了基础型热电偶和压力变送器，用于实时监控运行参数变化并联动报警系统。低风险等级的区域则继续执行常规管理模式，避免过度投入资源。

2.4 风险控制策略与技术支持

伴随自动化与数字化技术的发展，化工管道系统的风险控制手段也日益多样化和智能化。例如，一些大型化工企业已在其主干输送管道上部署了温度、压力、流速、振动等多参数传感器，通过智能数据采集终端将监测结果实时传输至中央控制平台。当系统检测到运行数据存在异常趋势时，可由算法模型自动触发预警信息并执行预设应急程序，及时阻断可能的风险扩散。在设备材质优化方面，许多企业开始采用双层复合管道结构或在高腐蚀区域使用内衬 PTFE、PFA 等高分子材料，有效延缓了腐蚀性介质对金属管壁的破坏速度。

在埋地管道系统中，则逐步引入阴极保护技术，并配合定期电位测试，确保防腐层完整性。此外，在人员管理层面，通过建立操作人员资质认证制度、编制岗位风险操作手册、定期开展事故模拟演练等方式，增强一线员工的风险识别能力和应急处置水平。例如，某企业每年组织两次不同工况下的泄漏应急演练，提升了员工对突发事件的应变能力与现场协作效率。这些多维度的技术和管理策略共同构成了化工管道系统本质安全的重要保障。

3 安全管理投入的经济效益分析

3.1 安全投入与效益评估指标

化工管道系统的安全管理不仅依赖于硬件设施的完善，还需建立健全的管理制度与持续的技术保障机制。在硬件方面，企业通常需投入先进的智能监控设备（如智能压力变送器、泄漏检测传感器）、耐腐蚀高性能材料（如 316L 不锈钢、衬 PTFE 复合管）、自动隔离阀、阻火器以及完善的消防喷淋与自动报警系统等。在制度建设方面，需包含员工定期安全培训、情景模拟应急演练、安全操作规程更新、第三方风险评估和安全审核等内容。

在效益评估方面，直接经济效益主要体现在事故发生频率的下降、突发停产时间的减少、维修成本与

备件采购费用的降低；而间接效益则反映在企业品牌形象的提升、员工工作积极性和安全感增强，以及商业保险费率降低和投资人信心的增长等方面。常见的评估指标包括年平均故障率（Annual Failure Rate, AFR）、单位事故损失成本（Loss Assessment Cost, LAC）、安全投入回报率（Return on Safety Investment, RSR）等，这些数据可为企业优化投资结构提供决策依据。

3.2 典型项目对比分析

在某石化企业的乙烯装置管道系统改造项目中，针对长期运行于高温、高腐蚀性工况下的物料输送管道进行全面升级，将原有碳钢管道替换为 316L 不锈钢外层加内衬 PTFE（聚四氟乙烯）的复合管材。该材料组合具备优异的抗酸碱腐蚀性能和化学稳定性，在输送硫酸、氯化氢、氨水等强腐蚀介质时表现尤为出色。其抗腐蚀能力相比原材料提升约 70%，并有效防止了结垢、内壁剥蚀等问题，使得管道系统的使用寿命由原先的 8 年显著延长至 15 年以上。

同时，为实现系统运行的智能化管理，该项目还配套安装了集成式在线监测系统，主要包括温度、压力、流量三位一体的传感器单元、数据采集与处理终端、PLC 控制模块及远程报警装置。通过连续数据采集和趋势分析，可对管道运行状态进行动态评估与风险预警。系统投运 5 年内，成功识别出 3 次初期异常波动并及时干预，避免了潜在的重大安全事故，相关损失估算超 200 万元。

从经济角度分析，项目总投资约为 120 万元，涵盖管道材料购置、设备安装、监测系统配置及运维费用。综合 5 年运行周期内节省的维修费用、停产损失及事故控制成本，总计节约成本超过 380 万元，计算得出的安全投入投资回报率（ROI）达到 3.2，充分说明在高风险区域进行前瞻性改造和智能化投入，具有良好的经济合理性与推广价值。

3.3 风险控制与投资回报率（ROI）模型构建

为合理评估管道安全管理投资效果，构建定量化的投资回报模型十分关键。该模型通常考虑三项核心指标：一是总投入成本 C，包括设备购置、安装调试、员工培训及后续运维支出；二是节约成本 S，指事故发生频率下降带来的直接损失减少，以及检修成本与保险费降低等；三是产能提升 P，如系统稳定性增强带来的生产效率提升或停工率降低后的产出增加。ROI 计算公式为： $ROI=(S+P-C)/C$

例如，某企业原因管道事故造成年均停产损失高达 200 万元，后续通过部署全面的智能监控系统和预防性维护体系，将损失控制在 50 万元以内，系统建设

及维护年成本为 60 万元，则 $ROI=(150-60)/60=1.5$ 。该结果表明该项投资具备良好的成本收益比，有助于增强管理层对安全投入的信心。

3.4 建议与优化路径

在当前高风险高责任的化工行业环境下，建议企业从生命周期成本（LCC）出发，建立覆盖设计、建设、运营、维护及报废全流程的安全投入规划体系。应明确高风险部位的安全投入优先权，设立专项资金用于风险等级高的关键装置、老旧管线及事故多发部位的改造与升级。

在技术手段方面，应引入数字化运维平台，通过工业物联网（IIoT）和大数据分析，实现安全风险的实时感知、预测与干预。同时，结合多维度经济评估指标，如单位安全成本占比、事故频率变化趋势、安全项目 ROI 值等，持续对安全投入的绩效进行动态跟踪与调整。

此外，建议企业加强与第三方专业机构的合作，引入独立评估机制，对企业安全管理体系进行周期性审查和优化，确保安全管理既符合行业标准，又具备良好的经济适应性和操作性，真正实现“安全管理经济化、经济管理数据化”的目标。

4 总结

化工管道作为企业物料输送系统的重要组成部分，其安全运行直接关系到生产的连续性和企业的经济效益。通过系统识别风险因素，结合适用的风险评估模型进行全面分析，并在实践中引入智能监测、材料优化及分级管控等多种技术与管理手段，可有效降低故障发生率，提升系统本质安全水平。实践表明，科学的风险评估不仅有助于精准识别高风险环节，更为企业合理配置安全投入、降低运维成本提供了决策依据。同时，管道系统的持续优化与规范管理，也进一步增强了企业的运营稳定性和抗风险能力，实现了安全与效益的双重提升。

参考文献：

- [1] 冯嘉恩. 浅析石油化工管道设计的影响因素及对策[J]. 新型工业化, 2022, 12(09): 25-27+31.
- [2] 李虎. 化工管道装置中泵类设备安装常见问题研究[J]. 化学工程与装备, 2024, (10): 111-113.
- [3] 蔺健宁. 浅谈石油化工压力管道的安全管理与风险评估[J]. 石化技术, 2023, 30(10): 251-252+125.
- [4] 武培森. 化工工程的设备布置与管道材料优化设计[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(16): 104-106.
- [5] 石守稳, 孙兴悦, 刘争, 等. 化工管道运输技术发展现状与展望[J]. 前瞻科技, 2024, 3(02): 94-101.