

化工液体管道常见故障及安全生产应对策略

陈 靖 杨永鑫^[通讯作者] (四川安信科创科技有限公司, 四川 成都 610046)

摘 要: 本文综述了化工液体管道系统中常见的故障类型及其成因, 包括腐蚀类故障、泄漏类故障和结构失效类故障。针对这些故障, 探讨了安全生产风险识别与评估的方法, 包括LOPA (保护层分析) 和HAZOP (危险与可操作性分析) 技术的应用, 以及关键参数的监测体系。在安全生产应对策略方面, 介绍了材料选型与防护技术、智能检测与维护技术、泄漏应急处置技术以及数字化管理平台构建等关键技术。通过实施这些策略和技术, 化工企业可以显著提升管道系统的安全性和运行效率。

关键词: 化工液体管道; 常见故障; 安全生产

中图分类号: TQ055.8

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 022-0118-03

Common Faults of Chemical Liquid Pipeline and Safety Production Response Strategy

Chen Jing, Yang Yongxin^[corresponding author]

(Sichuan Anxin Kechuang Technology Co., LTD., Chengdu Sichuan 610046, China)

Abstract: This paper summarizes the common fault types and causes in chemical liquid pipeline system, including corrosion, leakage and structural failure. For these faults, the methods of identification and assessment of safety production risks are discussed, including the application of LOPA (protective layer analysis) and HAZOP (hazard and operability analysis) technology, and the monitoring system of key parameters. In terms of safety production response strategies, the key technologies such as material selection and protection technology, intelligent detection and maintenance technology, leakage emergency disposal technology and digital management platform construction are introduced. By implementing these strategies and technologies, chemical enterprises can significantly improve the safety and operational efficiency of the pipeline system.

Key words: Chemical liquid pipeline; Common fault; Safe production

化工液体管道作为化工生产中的关键运输设备, 其安全性和可靠性对于保障生产过程的连续性和稳定性至关重要。然而, 由于介质性质的多样性、操作环境的复杂性以及管道材质的局限性, 化工液体管道在运行过程中常常面临各种故障风险。这些故障不仅可能导致生产中断、经济损失, 还可能引发严重的人员伤亡和环境破坏。因此, 深入分析化工液体管道常见故障类型及其成因, 并探讨有效的安全生产应对策略, 对于保障化工企业的安全生产具有重要意义。

1 化工液体管道常见故障类型及成因

1.1 腐蚀类故障

化工管道中的化学腐蚀主要表现为金属材料与输送介质之间发生不可逆的电化学反应, 例如在酸性或强碱性液体环境中, 金属表面的活性离子与介质中的电解质持续交换电荷, 生成可溶性化合物并脱离基体, 这一过程将导致管壁均匀性减薄并降低承压能力。另一方面, 电化学腐蚀的成因更为复杂, 既包括外部杂散电流 (如附近电气设备接地不良引发的漏电) 在管道表面形成电位差, 也涉及介质内部因组分分布不均或温度梯度造成的导电性差异, 此类腐蚀往往集中于

特定区域并形成点蚀坑, 随着腐蚀产物的堆积与应力集中效应叠加, 最终可能引发穿透性孔洞, 严重威胁管道的结构完整性。

1.2 泄漏类故障

在化工液体管道系统中, 焊缝区域的完整性易受焊接工艺质量影响, 若焊接电流参数设置不当、操作流程不规范或焊后热处理不充分, 焊缝内部易形成微观裂纹或气孔等缺陷, 这些缺陷在介质压力波动或周期性载荷作用下逐渐扩展, 最终演变为贯穿性裂缝并引发介质渗透风险。与之并行的密封失效问题则主要源于法兰连接部件的性能退化, 例如橡胶或金属缠绕垫片长期暴露于高温、腐蚀性介质中发生氧化脆化, 其密封接触面的回弹性能逐步丧失; 同时, 螺栓预紧力因安装扭矩偏差、蠕变效应或机械振动导致应力松弛, 致使法兰密封面无法维持有效压紧力, 在内外压差作用下形成微米级间隙, 造成持续性泄漏并可能诱发燃爆事故。

1.3 结构失效类故障

化工液体管道的机械损伤通常源于外部物理冲击, 例如重型设备操作失误或运输工具碰撞造成的局

部凹陷，此类外力作用不仅直接破坏管道几何形状，更会在受冲击区域形成应力集中点，随着交变载荷的持续作用，微观裂纹逐渐扩展并最终引发贯穿性断裂。

与此同时，热应力疲劳问题多发生于温度频繁波动的工况环境中，当管道系统的热膨胀系数与支撑结构设计不匹配时，周期性升降温会导致金属晶格发生塑性滑移，尤其在弯头、法兰等应力敏感区域，反复的膨胀收缩可能突破材料屈服极限，造成蠕变断裂或焊缝撕裂，严重时甚至引发系统性的结构失稳。

2 安全生产风险识别与评估

2.1 风险分级方法

在化工装置风险管控领域，LOPA（保护层分析）方法通过建立事件树模型与独立保护层有效性评估体系，能够精确计算介质泄漏事件的初始发生概率，并综合考量有毒物质扩散范围、可燃气体爆燃当量等参数，实现经济损失、人员伤亡及环境破坏等多维度后果严重度的定量化表征。与此同时，HAZOP（危险与可操作性分析）技术依托引导词驱动的结构化研讨模式，针对工艺节点中的流量、温度、压力等关键参数，系统识别由设备失效或操作偏离引发的异常工况，例如换热器结垢导致的传热效率下降可能诱发反应失控，这种定性与半定量相结合的分析手段可有效揭示传统检查难以发现的隐性风险耦合路径。

2.2 关键参数监测体系

在化工管道安全监测体系中，压力与温度的协同控制机制通过集成高精度压力变送器与分布式温度传感器网络，结合历史运行数据与实时工况动态调整阈值区间，当检测到压力-温度曲线偏离正常包络范围时，系统自动激活多参数耦合报警算法，及时触发联锁保护装置以避免超压爆管或高温介质相变风险。同步实施的介质成分在线监控方案则依托傅里叶变换红外光谱仪等精密仪器，对流动介质进行秒级响应的组分扫描，特别针对硫化氢、氯离子等具有强腐蚀特性的杂质离子实施痕量检测，其检测数据通过工业物联网平台与腐蚀速率预测模型实时交互，为缓蚀剂自动加注系统提供动态调节依据，从而在杂质浓度超标初期实现工艺参数优化与材料保护策略的闭环调控。

2.3 应急响应等级划分

在化工装置应急管理体系中，针对小规模介质泄漏事件，系统将依据气体检测仪定位结果自动关闭泄漏点上下游电动阀门，同时激活泄漏半径 5m 内的负压吸附装置，通过高分子聚合物吸附棉与化学中和剂联用实现泄漏物原位封存与降解，并联动 DCS 系统调整关联设备运行参数以维持区域压力平衡；而当泄漏扩散范围超过 10m² 或可燃/有毒物质浓度达到爆炸下

限 30% 时，应急平台将依据预设阈值触发全厂级连锁响应，包括切断主工艺进料管线、启动泄压火炬系统、释放声光报警信号引导人员沿预设逃生通道撤离，并同步激活消防泡沫覆盖与周边道路管制模块，形成立体化应急处置网络以最大限度降低事故升级风险。

3 安全生产应对策略与关键技术

3.1 材料选型与防护技术

在化工管道防腐技术领域，材料表面防护体系的优化至关重要。针对强腐蚀性介质输送场景，工程实践中广泛采用聚四氟乙烯（PTFE）喷涂工艺形成非粘性保护层，该材料凭借分子结构中稳定的 C-F 键及 0.1-0.3mm 的致密涂层厚度，可有效阻隔酸碱液渗透，同时其摩擦系数低于 0.05 的特性显著降低固体颗粒物对管壁的冲刷磨损；对于高温高压工况，则优先选用 UNS S32205 双相不锈钢材质，通过精确控制铁素体与奥氏体两相比比例（约 50:50）及氮元素（0.14-0.20%）微合金化处理，使其在含氯离子介质中抗点蚀当量 PREN 值提升至 40 以上。

在电化学防护层面，创新性地将传统牺牲阳极系统与智能外加电流技术集成应用：沿管线每间隔 30m 埋设镁合金阳极块（ASTM B843 标准），同时配置分布式恒电位仪网络，通过埋地参比电极反馈的电位信号（控制在 -850mV 至 -1100mV vs CSE）动态调节输出电流，这种混合保护模式不仅克服了单一阳极法在低电阻率土壤中的消耗过快问题，还能根据管道涂层老化程度自动匹配保护强度，配合埋地跨接均压器与绝缘法兰的精准电位梯度控制，使管道全段的保护电位达标率提升至 98% 以上，显著延长了地下管道的服役周期。

3.2 智能检测与维护技术

在管道完整性监测技术革新中，无人机搭载的 TOFD（衍射时差法超声检测）系统通过集成高频聚焦探头（5MHz-15MHz）与六轴稳定云台，可在距管道表面 0.5m-3m 范围内进行非接触式扫描，其发射的剪切波与纵波在焊缝缺陷处产生衍射信号，经飞行时间差计算与三维成像算法处理，能够精准识别深度 $\geq 0.1\text{mm}$ 的线性缺陷（如未熔合、夹渣）以及面积型缺陷（如气孔群），单次飞行覆盖 6km 管段且检测速度达 2m/s，大幅提升高架管道或沼泽地带的检测效率；与此同时，声发射在线监测系统通过布置在应力集中区域的宽频传感器阵列（50kHz-1MHz），实时捕获材料内部裂纹扩展时释放的弹性应力波，运用小波包络分析技术剥离环境噪声后，结合裂纹张开位移（COD）模型与断裂力学参量（如应力强度因子 K 值），构建裂纹扩展速率（da/dN）与声发射信号能量、撞

击次数的关联函数,当监测到特征频率信号(如300–400kHz的突发型信号)连续出现且幅值超过动态阈值时,系统自动触发三级预警机制,并基于历史数据训练的时间序列预测模型,预估剩余安全运行周期,该技术在LNG低温储罐焊缝监测中已实现提前72h预警穿透性裂纹的工程验证。

3.3 泄漏应急处置技术

在化工泄漏应急处置技术体系中,高压堵漏夹具采用高强度钛合金框架与多层楔形密封模块集成设计,通过液压驱动装置在30s内完成对泄漏点(DN50–DN300管径)的360°环向包裹,其内部填充的膨胀石墨–氟橡胶复合密封材料在接触泄漏介质后发生可控膨胀(体积增加率 $\geq 300\%$),形成与管道表面纳米级贴合的密封层,经实验室压力循环测试验证,该装置可在10–15MPa动态压力下维持72h无渗漏密封,特别适用于含硫化氢酸性气体的高压管道应急修复;与之配套的智能导流系统则通过环形负压罩体与泄漏点形成密闭腔室,由防爆型真空泵(抽气速率 $\geq 500\text{m}^3/\text{h}$)产生–95kPa稳定负压场,结合多普勒流量传感器实时监测泄漏速率,动态调节引流管道的阀门开度,将气液两相介质安全导入防爆认证的缓冲储罐(配备氮气惰化与静电消除装置),系统内置的介质兼容性数据库可自动匹配乙烯、液氨等28类高危物质的处置方案,并通过物联网平台与应急指挥中心联动,实现泄漏定位–堵漏作业–介质回收的全流程自动化处置,在炼油厂催化裂化装置的实际应用中成功将单次泄漏事故处置时间缩短至18分钟内,且二次污染发生率降低92%。

3.4 数字化管理平台构建

在数字化管道管理平台构建中,基于工业互联网架构的全生命周期数据库采用时序数据库与关系型数据库的混合存储模式,完整收录管道设计阶段的三维模型数据(包括壁厚公差、材料屈服强度等187项参数)、施工期的焊口坐标及探伤报告(TOFD/RT检测影像数据量达TB级)、运维期的在线监测数据集(涵盖声发射信号、壁厚超声检测值等每秒5000点的动态数据流)以及历次维修记录(含密封件更换时间、防腐层修复面积等结构化信息),通过ETL数据清洗工具实现多源异构数据(CAD图纸、PLC日志、GIS坐标)的标准化处理,并建立基于时间戳与空间位置的双重索引体系,为每段管道生成唯一的数字孪生体。

在此基础上部署的AI风险预测模型采用深度残差网络与时间卷积网络融合架构,输入层接收管道运行压力波动频谱、介质腐蚀性离子浓度梯度矩阵等42维特征向量,通过自适应注意力机制挖掘历史故障案

例中隐蔽的关联规则(如特定温度区间下氯离子浓度与点蚀速率的非线性关系),模型训练过程中引入对抗生成网络增强小样本故障场景的泛化能力,经100万组工业数据训练后实现未来30天内管道泄漏概率预测(误差率 $\leq 2.3\%$),预测结果通过SHAP值可解释性模块输出关键影响因子排序,并与企业ERP系统联动自动生成预防性维护工单,该体系在某跨国化工企业的应用实践中成功将非计划停车次数降低67%,年度维护成本减少1200万元。

4 结语

通过对化工液体管道常见故障及安全生产应对策略的深入研究,本文揭示了管道腐蚀、泄漏和结构失效等主要故障类型及其背后的复杂成因。在安全风险识别与评估方面,LOPA和HAZOP等方法的应用为精确评估风险提供了科学依据。同时,通过材料选型与防护技术、智能检测与维护技术、泄漏应急处置技术以及数字化管理平台构建等关键技术的实施,化工企业可以显著提升管道系统的安全性和可靠性。未来,随着智能化、数字化技术的不断发展,化工液体管道的安全管理将更加高效、精准,为化工行业的可持续发展提供有力保障。

参考文献:

- [1] 王伟硕.化工园区管道泄漏量分析研究[D].中国石油大学(北京),2018.
- [2] 张月.化工园区液体管道泄漏检测及定位研究[D].中国石油大学(北京),2018.
- [3] 李金海.非介入式液体管道阀门内漏监测系统设计与[D].北京化工大学,2016.
- [4] 刘万祯.特殊液体管道输送设计要点[J].化工矿物与加工,1999(06):28-31.
- [5] 王晓明,吕颖.化工园区压力管道泄漏封堵能力建设研究[J].安全与环境工程,2015,22(01):144-147.
- [6] 刘万祯.特殊液体管道输送设计要点[J].化工矿物与加工,1999(06):28-31.
- [7] 古文哲,杨宝贵,顾成进.煤炭管道输送技术应用前景研究[J].煤炭工程,2023,55(02):158-163.
- [8] 于新胜,陈益滨.管道输煤技术应用现状及展望[J].煤炭工程,2020,52(05):1-4.

作者简介:

陈靖(1985—),男,汉,四川眉山人,本科,中级工程师,研究方向:企业安全生产技术服务。

通讯作者:

杨永鑫(1990—),男,汉,四川南充人,本科,中级工程师,研究方向:化工安全生产技术服务。