

油气储运过程中管道泄漏风险识别与防控措施

吕俊豪 任玉倩 (西南油气田分公司华油公司, 四川 成都 610000)

摘要: 油气储运管道的泄漏风险, 长期被低估于系统复杂性与人为叠加的影响之中。技术的进步无法单独支撑起全面防控, 检测、维护、监控三者之间缺乏有效协同, 是事故频发的结构性症结。文章针对检测技术的早期预警能力、防腐涂层的系统化策略与智能监控系统的功能边界进行剖析, 提出多维动态风险识别模型的必要性, 强调防控体系必须植根于全过程治理逻辑而非单点技术堆叠。这不仅关乎效率, 更关系到行业本质的运行安全边界与持续运营能力。

关键词: 油气储运; 泄漏风险; 腐蚀控制; 智能监控; 应急处置

中图分类号: TE973 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 036-0163-03

Risk Identification and Prevention Measures of Pipeline Leakage in Oil and Gas Field Storage and Transportation

LV Junhao, Ren Yuqian (Southwest Oil and Gas Field Branch, Chengdu Sichuan 610000, China)

Abstract: The leakage risk in oil and gas storage and transportation pipelines has long been underestimated due to the compounded effects of system complexity and human factors. Technological advancements alone cannot support comprehensive prevention and control; the lack of effective coordination among detection, maintenance, and monitoring constitutes a structural cause of frequent incidents. This article analyzes the early warning capabilities of detection technologies, the systematic strategies for anti-corrosion coatings, and the functional boundaries of intelligent monitoring systems. It proposes the necessity of a multidimensional dynamic risk identification model and emphasizes that the prevention and control system must be rooted in a whole-process governance logic rather than isolated technology stacking. This concern goes beyond efficiency, directly relating to the fundamental operational safety boundaries and sustainable operational capability of the industry.

Keywords: Oil and gas storage and transportation; Leakage risk; Corrosion control; Intelligent monitoring; Emergency response

油气输送在工业体系中被认为是成熟领域, 但其安全机制依然存在长期滞后的结构性问题。泄漏并非偶然, 而是运行逻辑、材料行为与环境变量长期互动后的结果。过度依赖单一技术路径、忽略实际工况反馈, 使得早期识别机制失效, 后续控制被动。从风险视角看, 系统完整性远不止于设备状态, 更涉及制度、响应和数据结构的系统性协同。重新审视这一问题, 需要从各环节内部逻辑入手, 而不是停留在流程外壳。

1 油气储运管道泄漏概述

1.1 管道泄漏的分类

天然气管道泄漏按泄漏介质的不同分为原油管道泄漏、天然气管道泄漏和其他气体泄漏; 按管道泄漏发生的部位不同分为管道焊缝泄漏、管道阀门泄漏、管道腐蚀性泄漏等; 按泄漏量大小分为微泄漏、小泄漏、中泄漏、大泄漏; 按发生的时间间隔不同, 分为持续性、间歇性及突然性泄漏; 在实际泄漏事故案例中, 微泄漏事故虽然不明显, 但时间长, 可能会造成安全隐患; 小泄漏事故发现及时, 处理方便, 如果不能及时处理, 很可能造成大事故, 突发性泄漏事故影响最严重, 直接危害人类生命与财产安全。因此, 必

须明确泄漏分类, 以便为应急防控提供依据。

1.2 油气储运管道的基本结构

一根在役的油气管道并不是单纯的一根输油输气线, 它是由主体管道、防腐、绝热层、信号控制系统、阴极保护装置系统等多个系统组成的, 其中主体的承压运行, 防腐绝缘层和阴极保护的共同作用控制腐蚀速度, 信号系统保障流量与压力预警功能。各个系统相互制约、相互保护, 少任何一部分都可能减弱其自身系统的安全性。掌握管道这类结构的层次性是执行精准维修、精准排查的基础。

2 管道泄漏的主要问题

2.1 管道材料老化腐蚀的成因分析

油气介质腐蚀, 即油气管道沿线金属结构, 随着时间的推移受到油气介质、地下水体含水量、电化学反应等的影响, 造成性能的逐步劣化。内壁长时间受压高温气体或含硫、含水的石油等油品接触而发生化学反应、腐蚀, 外壁受地下水体、杂散电流、土壤酸碱度等的作用而产生电化学腐蚀, 腐蚀速率无法控制, 其腐蚀过程非常隐秘。部分老管线的管道防腐层因为脱落未及时修补而出现腐蚀加快的现象。部分老旧工

程设计理念,未考虑腐蚀要素,或缺少长效监控系统等,造成的管线金属材料的老化现象未得到有效遏制。这些问题经常是在某次突发性泄漏发生时才显性化,代价较大。

2.2 第三方施工破坏的常见形式

其他伤害事故。由于人为伤害通常指非工程设计自身因素造成的意外事故,就石油天然气管道而言,主要指的是第三方损坏事故。此类第三方损坏事故最为常见的是挖掘机开挖过程中误挖伤油气管道、高空物坠落伤油气管道、较大重物碾压伤油气管道等。除突发的以外,大多数都同信息沟通不足有联系。一是少有施工企业可以获得地下管线平面图,缺乏预见;二是管线上的警示标识缺失或模糊不清,导致施工人员作出错误的判断。难度较大是在城市化高速发展阶段,管道附近的施工多且管线周界扩大,加大了管控的难度。在具有高概率、高后果危害的因素上,管控措施不应当在后期发现问题再“修修补补”,而是将定位、监测、管控的措施前置。

2.3 极端环境对管道完整性的影响

恶劣环境和天气条件,使管道服役状态需要较高承受强度。热环境中加速物化反应,低温环境中钢材变硬脆,容易断裂。冻土环境中地基发生剧烈的上部下部沉降、管体受力不断变化产生疲劳裂纹^[1]。山区滑坡泥石流将强烈拉扯埋地管道,盐碱和严重污染区域,土壤腐蚀性物的活跃使管道的外表面被侵蚀的概率翻倍。上述条件经常不是独立起效,而是共振组合,造成负面交互效用放大。更糟糕的是,严苛环境往往同时出现抢修困难、无监管漏洞,事后补救成本巨高,需在管道选线、设计环节上将适应环境纳入决定性要求,预防为主。

3 油气储运过程中管道泄漏风险识别与防控措施

3.1 基于检测技术的泄漏风险早期识别方法

管道泄漏的早发现能力是决定事故处置及时性和可控性的重要因素,目前巡检及目视方法不能适应复杂运行条件下的高危区域监测,事故前期泄漏异常的信号弱、时间短,需要高灵敏度且智能化的检测方法。声发射检测、光缆分布式温度/振动传感和分布式可燃气体监测等作为早发现的手段在多源信息融合环境中的应用日渐增多,技术本身不能脱离具体应用去论其好坏^[2]。

识别系统的正确率依赖于信号干扰去噪、背景历史数据建模以及算法适用性,这离不开长期连续的数据样本积累,并与机器学习相结合以提升异常识别的可靠性。需要反思的是,目前行业容易被检测技术“一锤子买卖”的心态所影响,忽略了识别系统不断迭代、

现场磨合和及时更新的过程。技术不是目的,而是识别逻辑的继承。早期信号的判断不仅仅是仪器参数指标,还应基于运行历史、环境信息、介质特性及运营行为等方面综合分析研判。

只有“察觉”而没有“觉察”,会导致误报、漏报叠加,影响决策。所以,泄漏早发现真本领,与其说是技术如何先进,不如说是对风险演变趋势和机理的结构性认知及识别技术的动态适配。随着管道系统的复杂度和运行环境的多样化,单一技术难以全面覆盖所有泄漏风险场景,促使多传感器、多维度数据融合成为趋势。通过将声发射、光纤传感、气体监测等多种技术的数据进行深度融合和智能分析,不仅能提升检测灵敏度,还能有效降低误报率,实现对泄漏事件的精准定位和定性分析。

3.2 管道防腐涂层的选择维护策略

腐蚀是一个缓慢的过程,但是随着时间、介质、工况的变化一步步累积,逐步发育成腐蚀隐患。防腐层是腐蚀累积发展的第一道防线,其好坏决定着管道是否能够安全服役^[3]。可是现实中防腐往往是从其成本造价、工艺施工等出发,在服役的环境、维护对策的连续性等基本判断上却稍显不足,而强盐度、高湿度、强酸碱的交替,对涂层的附着力、耐候性、修复可行性等要求也提高了。

防腐不是厚度堆砌的追求,而是界面的粘结性和材料化学惰性和钝性之间互为牵制,单层防腐很难抵挡极限工况下互相作用的机制,于是多层复合涂层技术逐渐成为防腐体系的主流趋势,底层实现粘接、中层实现阻隔、外层是抗冲蚀,如何选择就变成了一本说明书不能解决的事情,它必须依据地质背景资料、管道埋设深度、土壤电导率和以往腐蚀概况进行综合判断。防腐涂层的维护策略同样重要,定期的状态监测和评估能够及时发现涂层损伤和失效风险,防止腐蚀隐患扩展。

现代技术如涂层完整性检测仪器、红外热成像及电化学检测方法,已逐渐应用于现场监测,提升维护的科学性和精准度。同时,应建立完善的维护管理制度,确保涂层修复工作的规范化和及时性,避免因小损伤未修复而引发大面积腐蚀。防腐体系的设计与维护需要多学科协同配合,包括材料科学、腐蚀工程、环境科学和管道运行管理,形成一套系统化的防腐解决方案。未来,随着新型纳米材料和智能涂层技术的发展,管道防腐将更加高效、环保且智能化。

3.3 智能监控系统在泄漏防控中的应用

智能监控系统应用对管道运行管理而言,并不是简单的管道运营业务过程“自动化”替代和升级,而

是一个风险逻辑的重构和运维业务模式的变革。传统的监测仅仅依靠人、分布式的监测传感器收集定性、静态数据,无法实现实时、连续、动态响应的防控响应机制。而智能监控则通过边缘计算、传感群和数据建模能够持续学习、实时响应,管道管控从“被动防控”向“实时感知、提前预警”转变。从部署来看,不同风险水平应采取差别化的布点策略,高风险段落加密数据、增加冗余路径等以保证监控的数据时效性、稳定性,技术部署是前提,核心是通过数据形成有含义的风险信号^[4],当前系统的数据存在大量冗余、误报警多、模型反应滞后等问题,是缺乏深度的运行逻辑建模和跨界数据融合的表现。单个参数的变化不能作为漏损判断依据,需要压力、温度、振动、流速等数据综合研判,形成“场景式”判断模型。只有能够适应工况、学习事件、自我校正的智能监控系统才算有效,这需要企业“使用”技术,更需要企业具有持续“训练”系统的思维能力。

3.4 应急响应流程泄漏快速处置方案

建设应急响应程序不只针对应急预案编制,而是针对泄漏事故一旦发生,在事故现场能够切实发挥作用的响应机制^[5]。泄漏事故本质是时间与信息不对称的战争。对于管道泄漏来说,并不是有没有应急程序,关键问题是程序能不能快速地化为有效行动。数据采集和分析的快速反应能力应该成为应急响应的重点。通过压力表、流量计和气体传感器等数据的多指标反馈来确认泄漏点并判断泄漏程度。应急程序的自动化处理可以跳过层级汇报的浪费时间,直接将行动指令发出到现场自动化设备,例如切断阀门及隔离受影响区域,减少现场处理时间。人员调度机制不是按照逐级负责制的串联流程,也不是靠单点指挥的链条,而是多部门、多功能平行体系,使现场一线能够即刻获得帮助。

同时,应急响应体系应注重演练和持续优化,通过模拟泄漏事故的实战演练,检验和完善响应流程,确保各部门协同高效运作,提升应对突发事件的实战能力。信息共享平台的建设尤为关键,实现泄漏现场信息的实时传递与共享,确保指挥中心、现场人员及相关单位能够同步掌握最新情况,避免信息孤岛和误判。

借助大数据和人工智能技术,结合历史事故数据和风险模型,提前预测泄漏可能发展趋势,指导应急资源的合理配置和优先级调整。此外,公众安全与环境保护同样是应急响应的重要组成部分,应制定明确的公众疏散、环境污染控制及善后处理方案,最大限度降低泄漏事故对人员和环境的影响,构建完善的管

道泄漏应急响应闭环体系。

3.5 人员培训操作规范优化

作业人员的培训不仅和作业能力相关,和作业意识和作业态度更是密不可分的深层次教育。现场培训的弊端是过度依赖作业纪律条文的罗列灌输,缺乏运用逻辑进行复杂作业环境下决策的影响因素分析。好的现场培训必须是基于现场工作的场景进行危险物化的操作逻辑分析,分析每项作业步骤之间的风险传导关系,并将相应的操作标准与过去的事态分析中潜在的原因联系起来,让操作员意识到这些动作的重要性,而不仅仅是执行任务。

同时,由于技术和工艺的升级,旧有的操作标准僵化的落实往往会让人员产生抵触和误读,影响操作标准的真正落实。在培训管理上,需要建立培训和反向反馈机制。员工作出提问和反馈,操作标准也是不断改善的动态过程,而不是固定不变的操作标准文件。培训方法的创新。现场实训练习、应急反应及多岗位交互培训将现场操作技能和相关专业有机结合起来,增强应对事故的能力。

4 结语

无论是风险监测技术还是风险控制管理技术,并没有“一技之长”“一法永用”的管道安全策略。演化的风险要有适应的认知。检测、管护与智慧之间,只有结构上的互动与迭代,才能产生有效的风险控制策略。技术经验是一方面,更重要的是建立一个动态的闭环运维框架,使得安全既是过程也是目的。

参考文献:

- [1] 廖绮,刘春颖,杜渐,等.人工智能赋能油气管道运行管理的应用及展望[J].油气储运,2024,43(6):601-613.
- [2] 孙青峰,常维纯,刘亮,等.“全国一张网”油气储运设施应急预案体系建设[J].油气储运,2024,43(2):134-143.
- [3] 姜昌亮.油气管道全生命周期质量管控与安全管理探讨[J].油气储运,2023,42(10):1081-1091.
- [4] 刁宇,李秋娟,刘朝阳,等.油气管道安全仪表系统检验测试方法[J].油气储运,2024,43(8):944-951.
- [5] 缴培妍.石油物资招标采购全流程风险识别与控制[J].石油石化物资采购,2024(24):7-9.

作者简介:

吕俊豪(1996-),男,汉,重庆市人,本科,助理工程师,研究方向:油气田开发与采油采气生产、城镇燃气。
任玉倩(1996-),女,汉,四川南充人,本科,助理工程师,研究方向:油气田开发与采油采气生产、城镇燃气。