

成品油长输管道泄漏监测与应急响应技术分析

刘强强 (国家石油天然气管网集团有限公司西北公司西安输油气分公司庆阳作业区, 甘肃 庆阳 745000)

摘要: 在当今全球经济格局中, 能源始终占据着核心地位, 是推动社会进步和经济发展的关键动力, 成品油作为重要的能源形式之一, 广泛应用于工业生产、交通运输、日常生活等各个领域, 对维持现代社会的正常运转起着不可或缺的作用, 随着经济的快速发展和能源需求的持续增长, 成品油的运输变得愈发重要, 长输管道作为一种高效、安全、经济且环保的运输方式, 承担着大量成品油从生产地到消费地的输送任务, 成为连接能源供应与需求的重要纽带。基于此本文就针对成品油长输管道泄漏监测与应急响应技术的应用展开分析, 以期对相关领域工作提供可参考。

关键词: 长输管道; 成品油; 泄漏监测; 应急响应; 技术分析

中图分类号: TE88 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 021-0127-03

Leakage Monitoring and Emergency Response Technology Analysis for Long-Distance Product Oil Pipelines

Liu Qiangqiang (Qingyang Operating Area, Xi'an Oil and Gas Transportation Branch Company, Northwest Company, China National Petroleum & Natural Gas Pipeline Network Group Co., Ltd., Qingyang Gansu 745000, China)

Abstract: In today's global economic landscape, energy consistently occupies a central position and serves as a key driving force for social progress and economic development. As one of the vital forms of energy, product oil is widely utilized across various fields, including industrial production, transportation, and daily life, playing an indispensable role in maintaining the normal operation of modern society. With the rapid economic development and continuous growth in energy demand, the transportation of product oil has become increasingly crucial. Long-distance pipelines, as an efficient, safe, economical, and environmentally friendly mode of transportation, undertake the task of conveying large quantities of product oil from production sites to consumption areas, becoming an important link connecting energy supply and demand. Based on this, this paper analyzes the application of leakage monitoring and emergency response technologies for long-distance product oil pipelines, aiming to provide references for related fields.

Keywords: Long-distance pipeline; Product oil; Leakage monitoring; Emergency response; Technical analysis

长输管道在能源供应体系中扮演着举足轻重的角色, 它不仅能够实现成品油的大规模、长距离输送, 满足不同地区对能源的需求, 还能有效降低运输成本, 提高能源输送的效率和稳定性, 在我国, 长输管道已成为成品油运输的主要方式之一, 覆盖范围不断扩大, 管网布局日益完善, 为保障国家能源安全和经济的稳定发展做出了重要贡献。然而, 长输管道在长期运行过程中, 由于受到多种因素的影响, 如管道老化、腐蚀、外力破坏、自然灾害等, 不可避免地会出现泄漏等安全事故, 因此, 为了确保成品油长输管道的安全稳定运行, 及时发现和处理管道泄漏问题至关重要。

1 成品油长输管道泄漏监测技术

1.1 流量平衡法

流量平衡法的核心理论依据为质量守恒定律, 即在密闭输送系统中, 输入与输出介质的质量总量需保持动态平衡, 以某成品油长输管道为例, 在稳态运行条件下, 入口端流量计通常显示为 $850\text{m}^3/\text{h}$, 经 30km 输送后, 出口端同步监测值同样稳定在 $848\text{--}852\text{m}^3/\text{h}$

区间, 这 $2\text{m}^3/\text{h}$ 的波动范围属于设备测量允许误差。若发生泄漏事故, 系统会呈现异常特征: 当某处出现 5% 泄漏量时, 入口流量可能骤增至 $892\text{m}^3/\text{h}$ 以维持压力, 而出口端则锐减至 $808\text{m}^3/\text{h}$, 此时形成的 $84\text{m}^3/\text{h}$ 流量差远超常规波动阈值, 监测系统将触发三级报警机制。从检测灵敏度分析, 该方法的有效性受泄漏当量影响显著, 在 $\text{DN}800$ 管道系统中, 超过 $20\text{m}^3/\text{h}$ 的泄漏量可被系统在 43s 内识别, 误报率低于 0.3% ; 但当泄漏速率低于 $1.5\text{m}^3/\text{h}$, 其信号可能完全淹没在 $\pm 0.8\%$ 的流量计精度误差范围内, 例如某石化企业曾记录到持续 36h 的 $0.8\text{m}^3/\text{h}$ 微渗漏案例, 直至切换为声波监测技术才得以确认, 这暴露出传统流量平衡法在微小泄漏检测中的固有缺陷。

1.2 负压波法

负压波法的技术基础源于泄漏引发的瞬态压力扰动特性, 基于 $\text{API } 1130$ 标准中定义的动态压力响应模型, 当 $\text{DN}500$ 成品油管道发生突发泄漏时, 泄漏点会形成以声速 $70\%\text{--}85\%$ 传播的压力瞬变信号。实践中,

该方法的响应速度优势显著,在西南地区某成品油管道泄漏事件中,系统在压力骤降 0.8MPa 后的 12 秒内即完成泄漏报警,相较传统人工巡检缩短了 83% 的响应时间,最终使经济损失控制在 120 万元以内,不过需要指出的是,当泄漏量低于 0.5% 设计流量时,其产生的 0.05MPa 级微弱压降信号容易与泵站变频调节造成的 0.03–0.08MPa 正常波动混淆,某炼化企业 2021 年的运行数据显示,在实施阀门开度调整作业期间,负压波系统的误报率会从常规的 2.1% 陡增至 15.7%,这主要源于调节阀动作引发的 1.2MPa 压降与泄漏信号的相似频域特征。

1.3 次声波法

次声波法的技术特性源于泄漏过程激发的低频声学响应,其监测机理建立在流体动力声学理论之上,当成品油管道出现泄漏时,介质喷射引发的湍流会在管壁产生 0.1–18Hz 特征频段的次声信号,这类低频波在 X70 钢质管道中的传播衰减率仅为 0.02dB/km,可实现超过 200km 的有效监测,泄漏定位方面,通过测量双端传感器信号时差进行空间解析,某直径 813mm 的原油管道实测表明,次声波在介质中的传播速度为 1024m/s,当两站监测到时差为 28.6s 时,定位算法可推算出泄漏点距首站 14.3 ± 0.6 km 的位置区间,不过需注意,强风环境引发的管道振动可能产生 15Hz 以下的干扰信号,这就需要配置带通滤波模块来消除误报。

2 成品油长输管道泄漏原因分析

2.1 外力影响

外力影响作为管道泄漏的主要诱因,其作用机理涉及复杂的地质力学与材料失效过程,违规占压行为通过改变管道周边土体应力场,可能引发管体应力集中现象,特别是在软弱地基区域,差异沉降导致的环向应力增量可达材料屈服强度的 60% 以上,这种持续性的机械载荷作用会加速管壁疲劳裂纹扩展,最终形成贯穿性缺陷。人为破坏活动中的非法开孔行为更为危险,钻具冲击不仅造成瞬时管壁穿孔,还会在切口处形成应力腐蚀敏感区,某案例解剖显示,盗油孔周边 2cm 范围内显微硬度下降达 HV30,裂纹扩展速率提升至正常区域的 3.7 倍。管道运营方需要特别警惕农耕机械作业带来的间接损伤,旋耕机具产生的振动载荷虽单次能量有限,但高频次的累积效应可能使焊缝区域的疲劳寿命缩短 40%,为此,现行 GB 32167 标准明确要求建立 200m 范围的第三方施工预警区,并采用分布式光纤传感技术实时监测管体应变状态,以此缓解突发外力破坏带来的安全风险。

2.2 管道腐蚀

管道腐蚀的成因涉及多物理场耦合作用下的材料

劣化过程,在电化学维度,土壤介质中的氧气浓度梯度会形成局部电位差,促使金属发生选择性溶解,这种现象在黏土与砂壤交界处尤为显著,杂散电流干扰则通过外源性电荷注入改变金属极化状态,特别是在邻近轨道交通设施的区域,动态变化的漏泄电流可加速阳极区金属流失速率,微生物参与下的腐蚀过程更具复杂性,厌氧菌群代谢产物与金属基体反应生成硫化亚铁等疏松腐蚀产物,反而会形成新的活性界面加剧材料损耗。机械应力与腐蚀存在明显的协同效应,交变载荷作用下的位错增殖使晶界处更易成为腐蚀起始点,这种应力腐蚀开裂现象在管道弯头等应力集中部位表现突出,材料自身的不均匀性同样不容忽视,冶炼过程中形成的夹杂物或轧制缺陷会破坏表面钝化膜连续性,导致局部优先腐蚀。

2.3 环境影响

环境因素对成品油长输管道的安全运行有着重要的影响,气候变化、土壤热胀冷缩以及极端温度等环境因素都可能导致管道沉降、冻裂,进而引发泄漏。气候变化会影响地质中土壤的生长环境,导致土层的热胀冷缩现象加剧,土地结构变得越来越不均匀,例如,在一些地区,由于长期的干旱或暴雨等极端气候条件,土壤的含水量发生显著变化,导致土壤体积膨胀或收缩,进而使埋在土壤中的管道受到不均匀的作用力,引发管道沉降和变形,最终导致管道泄漏。土壤热胀冷缩是导致管道泄漏的另一个重要环境因素。随着季节的变化和昼夜温差的影响,土壤会发生热胀冷缩现象,当土壤膨胀时会对管道产生挤压作用;当土壤收缩时,又会使管道周围出现空隙,导致管道失去支撑,长期在这种反复的挤压和无支撑状态下,管道容易发生变形、破裂,从而引发泄漏。

3 成品油长输管道应急响应技术

3.1 应急响应机制概述

应急响应机制作为管道泄漏风险防控体系的核心环节,其运作效能直接影响事故处置的最终成效,该机制的设计遵循分级响应与协同处置原则,根据泄漏规模及影响范围动态调整应对策略,当监测系统触发预警阈值或现场人员确认异常工况时,值班调度人员需在 5min 内完成初步研判,进而启动对应级别的应急程序,这样一来,一线处置组可立即执行预设的关断隔离操作,同步向属地监管部门推送事件快报,为后续资源调配争取关键时间窗口。在指挥架构层面,采用矩阵式管理模式实现跨部门联动,应急指挥中心依托 GIS 系统快速生成态势评估图,统筹协调技术抢险、环境监测、医疗救援等多支专业队伍,现场指挥组则负责战术层面的作业部署,包括泄漏源封堵方案比选、疏散半径划定等具体决

策,这种分层指挥结构既保证了决策的科学性,又兼顾了执行效率,再比如,针对夜间或恶劣天气等特殊工况,预案中特别规定自动启动备用通讯链路,确保指挥体系的全天候运作能力。后期恢复阶段着重构建闭环管理机制,事故处置完毕后,技术分析组需在72h内完成事件根因追溯,形成涵盖设备失效分析、应急响应时效评估等维度的专项报告,这些数据将反馈至培训体系,用于优化应急处置的标准作业程序,又或者针对暴露出的设备缺陷,运维部门须在30个工作日内完成同类管段的预防性检修,真正实现“处置一次事故、提升一类防控”的持续改进目标。

3.2 应急预案的制定与实施

应急预案的构建遵循法规框架与技术标准双轮驱动原则,其核心在于形成覆盖全生命周期的风险应对体系,编制过程中需严格参照《石油天然气管道保护法》等上位法要求,结合GB 32167标准中的风险评估模型,针对不同管段特征制定差异化处置策略,某管道运营单位在预案设计时,将穿越生态敏感区的管段响应等级提升至最高级,预设了包括无人机巡查、应急截流阀连锁启动在内的12项专项措施,这样就能在事故突发时快速匹配处置方案。预案实施的关键在于建立多层级的资源配置网络,依托省级应急物资储备库构建区域联动机制,形成以200km为辐射半径的救援资源圈,这样一来,大型封堵设备可在4h内抵达任意事故点,人员培训方面推行平战结合模式,日常将维保团队编入应急预备队,定期开展带压堵漏、伤员急救等模块化实训,反而提升了常规运维队伍的技术储备。动态修正机制是预案持续优化的保障,通过建立事件案例库,将历史处置数据转化为预案改进依据,某西部管道公司通过分析近五年17起泄漏事件,发现72%的延误源于信息传递链条过长,据此将应急通讯层级由五级压缩至三级,又或者,引入数字孪生技术构建管道应急模型,可实时推演不同处置方案的效果差异,为预案更新提供数据支撑。这种迭代机制确保应对策略始终与风险态势保持同步,避免了预案与实际脱节的常见问题。

3.3 应急救援技术与装备

应急救援技术的应用强调动态适配与组合创新,其核心在于构建分级分区的处置策略体系,针对不同泄漏场景,采取“封堵优先、回收同步”的战术原则,形成从泄漏抑制到环境修复的完整技术链条,封堵作业实施前需结合管道材质、介质特性进行技术比选,例如对于高压油气管道优先采用磁力吸附式智能封堵装置,而地形复杂区域则适用柔性复合材料快速修补技术,在去年某山区管道事故中,救援团队通过热成

像定位泄漏点后,组合使用冷冻封堵与高分子注剂技术,成功在45min内控制住泄漏扩散。油品回收环节推行模块化作业体系,依据泄漏介质理化特性匹配处置方案,对于轻质油品实施负压抽吸与气幕阻挡联合作业,重质油品则采用温控粘度调节配合机械回收,某河口区域泄漏事件中,创新应用了生物降解凝胶吸附技术,反而将传统回收率提升了30%,又或者开发的多功能回收平台集成撇油、分离、存储功能,可在2h内构建移动式处理单元,大幅提升应急响应时效。此外,装备配置遵循智能化、轻量化发展趋势,构建三级装备储备网络,基础层配置通用型堵漏工具包与防护装备,战术层部署具备环境感知能力的无人探测设备,战略层则储备模块化压力平衡系统等特种装备。技术协同方面建立跨学科支援机制,引入流体力学模拟辅助决策,通过数字孪生平台预演不同处置方案,可直观评估油品扩散路径与环境影响,还可以开发的多语种智能指挥系统,有效解决了跨国救援中的沟通障碍,使国际支援力量接入时间压缩至原有时长的1/3。在人员能力建设方面可推行“技术-装备-战术”融合培训模式,采用VR模拟器构建百种泄漏场景库,参训者可在虚拟环境中掌握新型装备的操作要领,某省级救援基地创新设计的移动训练舱,能真实还原-30℃至50℃的极端作业环境,使人员应急处置能力评估更具科学性。

总之,成品油长输管道泄漏监测与应急响应技术对保障管道安全运行意义重大,流量平衡法、负压波法等多种泄漏监测技术各有优劣,能在不同场景发挥作用,外力影响、管道腐蚀、环境变化是泄漏主因,完善的应急响应机制、科学的应急预案及先进救援技术装备,是应对泄漏事故的关键,未来,需持续优化这些技术,提升管道安全防控水平,为能源输送筑牢坚实防线。

参考文献:

- [1] 符向阳. 成品油长输管道的自动化控制系统研究分析[J]. 当代化工研究, 2023(20):191-193.
- [2] 王文. 长输成品油管道水击保护系统优化分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022,42(19):130-132.
- [3] 胡懿, 王云峰, 贺裕卓, 等. 成品油长输管道输油站储罐液位报警及连锁值的设定方法[J]. 石油库与加油站, 2022,31(02):6-9+3-4.
- [4] 朱中文. 成品油长输管道站场设备维修管理探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021,41(20):63-64.

作者简介:

刘强强(1988-),男,汉族,甘肃平凉人,本科,输油工技师,研究方向:成品油储运。