

油气管道运输泄漏及其应急管理机制

杨继平

国家管网西部管道独山子输油气分公司阿拉山口输油站 新疆 维吾尔自治区 833418

摘要: 油气管道运输泄漏是能源安全重大挑战, 泄漏成因涵盖管道腐蚀、第三方破坏、地质灾害及操作失误等, 易引发环境污染、火灾爆炸及经济损失。应急管理需构建预防、准备、响应、恢复全流程机制, 包括全周期风险评估、分级响应、智能监测技术应用及应急资源动态调度。同时需完善法规体系, 强化政企协同与公众参与, 推动技术创新以提升应急决策效率与科学性。

关键词: 油气管道; 运输泄漏; 应急管理机制

引言: 油气管道作为能源运输的“生命线”, 其安全运行直接关系到国家能源安全与社会稳定。然而, 受管道老化、第三方破坏、地质灾害及人为操作失误等因素影响, 油气泄漏事故频发, 不仅造成资源浪费与环境污染, 更易引发火灾爆炸等次生灾害, 威胁公众生命财产安全。在此背景下, 构建科学高效的应急管理机制, 通过风险预控、智能监测与协同响应, 成为降低泄漏危害、提升管道安全韧性的关键所在。

1 油气管道运输泄漏风险分析

1.1 泄漏成因与分类

(1) 内在因素: 主要源于管道自身材质与结构缺陷, 是泄漏的潜在隐患。其中腐蚀是最常见因素, 包括土壤电化学腐蚀、介质冲刷腐蚀等, 长期作用会逐步削弱管壁厚度; 材料缺陷多产生于生产阶段, 如管材杂质超标、晶粒不均匀等; 焊接问题则出现在施工环节, 未焊透、焊瘤、裂纹等缺陷会降低接头强度, 形成泄漏薄弱点。(2) 外在因素: 是引发泄漏的主要诱因, 受环境与人为操作影响显著。第三方破坏涵盖施工挖掘碰撞、车辆撞击、非法打孔盗油等, 近年来占比持续攀升; 地质灾害包括地震、滑坡、泥石流等, 易导致管道变形甚至断裂; 操作失误多为人员违规操作阀门、调控参数偏差或监控疏漏, 引发瞬时压力异常而泄漏。(3) 泄漏类型: 按泄漏形态与成因可分为三类, 穿孔泄漏多由局部腐蚀、小范围冲击导致, 泄漏量较小但持续时间长; 断裂泄漏多因地质灾害、严重第三方破坏引发, 泄漏量大且后果严重; 人为破坏泄漏为故意打孔等行为导致, 泄漏形式不规则, 还可能伴随安全事故^[1]。

1.2 风险评估模型

(1) 定量风险评估(QRA)方法: 通过量化风险指标实现精准评估, 核心方法包括故障树分析, 以泄漏事故为顶事件, 反向追溯各层级致因并计算发生概率; 蒙

特卡洛模拟则通过随机模拟管道工况参数波动, 预测不同场景下的泄漏风险等级, 为防控措施制定提供数据支撑。(2) 高后果区(HCA)识别标准: 聚焦泄漏影响严重区域, 核心判定指标包括人口密度, 以管道周边一定范围内常住人口数量为基准; 环境敏感区涵盖自然保护区、生态湿地等; 水源地包括饮用水源保护区、地下水源涵养区等, 此类区域一旦泄漏将引发重大生态与民生危害, 需重点监控。

2 油气管道运输泄漏检测与监测技术

2.1 传统检测技术

(1) 核心技术类型: 人工巡检是基础手段, 通过巡检人员现场排查管道外观破损、周边异常施工等情况, 配合设备仪器检测泄漏气体浓度; 压力波法利用管道内介质压力突变信号识别泄漏, 当泄漏发生时, 压力波沿管道双向传播, 通过传感器捕捉信号定位泄漏点; 负压波法是压力波法的优化形式, 聚焦泄漏产生的负压扰动, 通过分析负压波传播速度与时间差确定泄漏位置。(2) 主要局限性: 实时性差是共性问题, 人工巡检受巡检周期限制, 无法及时发现瞬时泄漏, 压力波与负压波法易受管道长度、介质流速影响, 信号传输存在延迟; 误报率高, 管道内介质正常波动、阀门操作等易被误判为泄漏信号; 综合成本高, 人工巡检需投入大量人力成本, 传统传感设备的安装与维护费用也较为高昂。

2.2 智能监测技术

(1) 分布式光纤传感技术: 核心包括分布式温度传感(DTS)与分布式声学传感(DAS), 利用光纤作为传感介质, DTS通过监测光纤温度变化识别泄漏(油气泄漏会伴随温度异常), DAS则捕捉管道振动、介质流动异常等声学信号, 具备全分布式、长距离监测优势, 定位精度高。(2) 无人机/机器人巡检技术: 依托移动平台实现自动化巡检, 无人机搭载红外热成像仪、激光雷达, 可

快速覆盖长距离、复杂地形管道，识别管道泄漏产生的温度异常与气体扩散痕迹；管道机器人可进入管道内部，近距离检测管壁腐蚀、裂纹及内部泄漏点，适用于人工难以抵达的场景。(3) 物联网(IoT)与大数据平台：通过在管道沿线部署温度、压力、气体浓度等传感器，实现实时数据采集与传输；大数据平台对多源数据进行融合分析，构建泄漏预警模型，可精准区分正常波动与泄漏信号，同时实现泄漏风险的提前预判，提升监测智能化水平^[2]。

2.3 技术对比与适用场景

(1) 长输管道vs城市管网：长输管道距离远、地形复杂，优先选用分布式光纤传感、无人机巡检等技术，可实现大范围、低人力成本监测；城市管网密度高、周边环境复杂(建筑物多、人员密集)，适合采用物联网+大数据平台、管道机器人巡检，兼顾精准定位与实时预警，减少对周边环境的干扰。(2) 陆地管道vs海底管道：陆地管道场景多样，平原区域可结合人工巡检与无人机巡检，山区、沙漠等复杂地形优先采用分布式光纤传感；海底管道环境恶劣、检修难度大，重点选用分布式光纤传感(耐高压、耐腐蚀)与水下机器人巡检，配合物联网平台实现远程实时监测，降低水下作业风险与成本。

3 油气管道运输泄漏应急管理机制构建

3.1 应急管理体系框架

(1) 预防阶段：核心是前置风险防控，一方面开展全周期风险评估，结合管道工况、周边环境动态更新风险台账，精准识别高风险段；另一方面编制针对性应急预案，明确泄漏等级划分、处置责任主体及核心流程，确保预案科学性与可操作性。(2) 准备阶段：聚焦应急能力储备，包括物资储备(按泄漏等级配置堵漏设备、消防器材、防护装备等，建立跨区域物资调配点)、培训演练(定期开展实战化演练，提升人员泄漏识别、应急处置技能)及跨部门协作(建立公安、消防、环保、医疗等部门联动机制，明确协同职责)。(3) 响应阶段：实行分级响应，根据泄漏量、影响范围划定一般、较大、重大、特别重大四级事件，匹配对应处置资源；现场处置遵循“先控后治”原则，优先开展堵漏止损，同步实施消防防爆、人员疏散、周边环境监测等措施，防止风险扩散^[3]。(4) 恢复阶段：重点推进事后修复与责任落实，包括环境修复(对受污染土壤、水体开展治理，恢复生态功能)、事故调查(查明泄漏成因，梳理管理漏洞)及责任追溯(依法追究相关单位与人员责任，形成监管震慑)。

3.2 关键要素分析

(1) 应急预案的动态优化：依托情景模拟技术，构

建不同泄漏场景(如长输管道断裂、城市管网穿孔、海底管道泄漏)，检验预案可行性；结合事故案例与技术升级成果，定期更新预案内容，解决预案与实际处置脱节问题。(2) 应急资源调度模型：构建智能化调度体系，整合物资、人员、设备等资源信息，建立动态数据库；基于泄漏等级与地理位置，通过算法快速匹配最优调度方案，实现资源精准投放，提升应急处置效率。(3) 政企协同机制：明确三方责任边界，政府履行监管与统筹协调职责，建立应急指挥平台；企业落实主体责任，强化日常防控与应急处置能力；畅通公众参与渠道，开展科普宣传，鼓励公众举报管道安全隐患。

3.3 国际经验借鉴

(1) 美国：依托管道与危险物质安全管理局(PHMSA)建立全流程监管体系，制定统一的应急响应标准，明确泄漏报告时限、处置流程及责任追究机制，同时推行管道安全信息公开，强化社会监督。(2) 欧盟：通过SEVESO指令构建区域应急联动机制，针对危险物质泄漏制定统一的风险评估与应急处置规范，推动成员国之间应急资源共享、信息互通，提升跨境管道泄漏处置协同能力。(3) 我国：现行《石油天然气管道保护法》等法规明确了管道保护与应急处置的基本要求，但仍需在三方面改进：一是完善应急预案动态更新机制，强化情景模拟应用；二是构建全国性应急资源调度平台，提升跨区域协同能力；三是拓宽公众参与渠道，健全管道安全科普与隐患举报体系。

4 油气管道运输泄漏应急管理优化策略

4.1 技术创新方向

(1) AI驱动的泄漏预测与智能决策系统：依托大数据与人工智能技术实现应急管理前置化、精准化。通过整合管道运行参数、环境监测数据、历史泄漏案例等多源信息，构建AI预测模型，可提前识别管道腐蚀加剧、设备老化等潜在泄漏风险，实现“事前预警”；在泄漏发生后，系统能快速分析泄漏量、扩散路径、周边敏感目标分布等信息，自动生成最优处置方案，包括堵漏设备选型、人员调配路线、疏散范围划定等，大幅提升应急决策效率与科学性，解决传统决策依赖经验、响应滞后的问题。(2) 区块链技术用于应急物资追溯与信息共享：利用区块链去中心化、不可篡改、可追溯的特性，构建全链条应急物资管理与信息共享平台。一方面，对堵漏器材、防护装备、消防物资等关键应急物资的采购、存储、调配、使用全流程进行区块链存证，实现物资来源可查、去向可追，避免物资积压浪费或调配不及时；另一方面，打破政企、跨区域部门之间的信息壁垒，实现

泄漏预警信息、管道基础数据、应急资源信息等实时共享,确保各处置主体协同联动,提升应急响应的整体性与高效性。

4.2 管理机制优化

(1) 应急演练的虚实结合:创新演练模式,突破传统实战演练成本高、场景单一、风险大的局限。通过VR/AR技术构建高仿真泄漏场景,如长输管道断裂、城市管网燃气泄漏爆炸、海底管道高压泄漏等,让演练人员沉浸式体验泄漏处置全流程,重点训练风险识别、设备操作、协同配合等关键技能;同时结合少量实战演练检验模拟训练效果,实现“虚拟仿真提升技能+实战演练强化协同”的互补,大幅提升应急队伍的实战处置能力,降低演练成本与安全风险^[4]。(2) 公众教育与社区应急能力建设:强化公众在应急管理中的参与度与自救互救能力。通过社区宣传栏、短视频平台、线下讲座等多种形式,开展管道安全科普教育,普及油气泄漏识别方法(如气味、声音、视觉信号)、自救措施(如关闭阀门、撤离路线、防护方法)、报警流程等知识;在管道周边重点社区建立志愿应急队伍,开展针对性培训与演练,配备简易堵漏工具、灭火器等基础应急物资,构建“企业主导、社区参与、公众响应”的基层应急防护网络,减少泄漏事故造成的人员伤亡与财产损失。(3) 保险机制与风险转移:引入市场化风险分担机制,降低企业应急处置与损失赔偿压力。推动油气管道运营企业投保环境污染责任险、安全生产责任险等相关险种,明确保险责任范围,涵盖泄漏导致的环境污染治理费用、人员伤亡赔偿、财产损失等;同时鼓励保险公司参与管道安全风险,通过专业评估为企业提供风险防控建议,形成“保险+防控+赔偿”的风险转移闭环,提升应急管理的可持续性。

4.3 政策建议

(1) 完善法律法规:健全管道应急管理法治保障体系,在现有《石油天然气管道保护法》基础上,进一步细化应急管理相关条款。明确要求新建管道必须安装分布式光纤传感、物联网监测等智能设备,老旧管道限期完成智能化改造;规范泄漏事故报告时限、处置流程、责任追究标准,加大对违法违规运营、应急处置不力企业的处罚力

度,以法律刚性约束推动企业落实主体责任。(2) 建立全国性管道应急数据中心:统筹推进应急管理数字化建设,由政府牵头构建全国统一的油气管道应急数据中心。整合全国管道基础信息、运行监测数据、应急资源台账、历史事故案例、气象地质灾害预警等数据资源,实现数据集中管理与共享共用;依托数据中心构建全国性应急指挥调度平台,支持跨区域、跨部门应急联动指挥,提升重大泄漏事故的统筹处置能力^[5]。(3) 推动标准化建设:构建全链条标准化体系,规范应急管理各环节工作。在检测技术方面,制定智能监测设备选型、安装、校准的统一标准,确保监测数据的准确性与兼容性;在应急流程方面,明确不同等级泄漏事故的处置规范、响应时限、责任分工,统一应急物资分类标准与调配流程;同时推动应急技术、管理经验的标准推广,提升全国油气管道应急管理的规范化、同质化水平。

结束语

油气管道运输泄漏应急管理是保障能源安全、守护生态环境的最后防线。面对复杂多变的泄漏风险,唯有以技术创新为驱动,融合智能监测与AI决策系统;以制度优化为支撑,完善法规标准与协同机制;以社会共治为基础,强化公众参与与风险分担,方能构建“预防-响应-恢复”全链条韧性体系。未来需持续迭代管理策略,推动应急管理向智能化、精准化、社会化迈进,为能源运输安全筑牢坚实屏障。

参考文献

- [1] 欧勇.油气管道运输泄漏及其应急管理机制[J].化工设计通讯,2020,46(05):111-112.
- [2] 曾锋,张乐波.石油管道运输突发事件应急管理[J].现代职业安全,2021,(10):82-84.
- [3] 陈宝生,吴同,韩汶昕等.输油管道泄漏检测技术发展现状[J].新型工业化,2020,10(05):136-140.
- [4] 刘建伟.长输石油管道泄漏检测与定位技术分析[J].石化技术,2021,28(06):85-86.
- [5] 高琳,曹建国.管道泄漏检测中两个难点问题的研究进展[J].科学技术与工程,2021,21(31):132-134.