

天然气管道安全性分析及泄漏检测

郑 义 梁 洪

国家石油天然气管网集团有限公司华南分公司 广东 广州 510000

摘 要：天然气管道是我国能源输送体系的核心载体，其安全稳定运行直接关系到沿线民生保障与公共安全。本文从连续性、密闭性、高压性与介质危险性四大维度梳理天然气管道的特殊运行安全特性，从本体缺陷老化、外部环境侵蚀、运行工况波动三个层面系统剖析泄漏诱因，对比分析直观检测、仪器传感检测、声波与红外检测三类主流泄漏检测技术的适配场景与技术优势，最终从本体防护、智能检测、工况与环境管控三个角度提出全链条安全防护与泄漏防控策略，可为天然气管道运维单位完善安全管控体系、降低泄漏事故风险提供专业实操参考。

关键词：天然气管道；运行安全；风险分析；泄漏检测；安全防控

引言：当前我国天然气长输管网与城镇燃气管网规模持续扩张，管道服役年限逐步增长，各类结构性隐患与运行风险不断累积，泄漏事故已成为威胁管道运行安全的核心问题。不同于常规输送设施，天然气管道的特殊运行属性使其隐患隐蔽性强、失效演化速度快，一旦发生泄漏极易引发燃爆类安全事故。传统运维模式已难以适配当前管道精细化安全管控的要求，亟需系统梳理管道安全运行逻辑与泄漏防控路径，构建全周期的安全保障体系，对保障能源输送安全、防范公共安全事故具有重要的工程实践价值。

1 天然气管道安全运行特性

天然气管道输送系统的特殊运行属性，是其全生命周期内存在安全风险的核心根源，整体运行特性可明确划分为连续性、密闭性、高压性与介质危险性四个维度，每个维度都直接作用于管道的安全运行状态。（1）天然气管道属于全天候不间断运行的连续输送设备，正常工况下无计划停机休整环节，长期处于持续载荷作用状态，管道本体材料、焊缝连接部位、附属密封构件会持续产生交变疲劳效应，施工或运行阶段产生的微小结构缺陷，会随着累计运行时长的增加逐步累积扩张，最终发展为影响结构安全的显性隐患。（2）管道采用全密闭的输送结构，正常运行过程中管内介质无外泄、无额外损耗，但该特性也导致管道本体的早期微小泄漏、埋地隐蔽部位的结构缺陷无法被直接观测，隐患在发展初期难以被人工巡检发现，具备极强的隐蔽性，容易错过隐患处置的最佳窗口期。（3）为保障长距离输送效率，天然气管道普遍采用高压输送工况，管内运行压力远高于外部常压环境，对管道母材强度、焊接质量、接口密封性能的技术指标要求严苛，长期高压载荷会持续加速管材老化与原有缺陷的扩展速率，提升结构失效的概

率。（4）管道内输送的天然气介质以甲烷为核心组分，具备无色无味、扩散速率快、爆炸极限区间宽的特性，泄漏后可快速在局部受限空间内聚集，达到临界浓度区间后接触点火源即可触发燃爆类安全事故，大幅提升了管道全周期运行的安全管控难度^[1]。

2 天然气管道安全风险及泄漏诱因分析

2.1 管道本体材质缺陷与老化风险

管道本体结构性能缺陷与材料老化是引发泄漏的内部核心因素。管道在加工成型过程中，易存在壁厚不均、焊缝夹杂、气孔、微裂纹、材质不均匀等原生缺陷，这类缺陷会造成管道局部结构强度不足。在长期高压、交变载荷的作用下，缺陷位置会产生应力集中，逐步发生塑性变形、裂纹扩展，最终形成穿孔、破损泄漏。同时，金属管道长期服役会出现自然老化现象，材料韧性、抗疲劳性能逐步下降，结构脆性增加。管道配套的密封垫片、防腐涂层、缓冲构件等附属部件老化速度更快，易出现开裂、脱落、硬化失效等问题，导致管道密封性能、防腐性能大幅下降，失去对管道本体的防护作用，最终诱发天然气泄漏。此外，管道长期处于额定负荷或超负荷运行状态，会加速材料疲劳损伤，进一步提升泄漏风险。

2.2 外部环境影响风险

管道铺设环境复杂多变，各类外部环境因素会持续对管道结构造成侵蚀与机械损伤，是诱发管道泄漏的重要外部原因。埋地管道长期与土壤直接接触，土壤中的盐分、酸碱物质、潮湿水汽会持续对管道外壁产生电化学腐蚀与化学腐蚀，逐步磨损管壁、降低管道壁厚，造成局部穿孔泄漏。架空管道长期暴露在自然环境中，温差交替、紫外线照射、空气氧化会加速防腐层、保温层老化破损，使管道金属基体直接暴露，加快腐蚀速率。

同时,地质环境的动态变化会对管道产生机械作用力,地面不均匀沉降、土体位移、地层震动等现象,会使管道发生拉伸、扭曲、挤压形变,造成焊缝开裂、管体断裂。此外,管道周边的机械撞击、土体挤压、人为扰动等外力作用,会直接破坏管道结构,引发突发性泄漏问题^[2]。

2.3 运行工况与介质诱发风险

管道运行工况波动与输送介质的理化特性,是加剧管道损伤、诱发泄漏的关键动态因素。在管道启停、压力调节、输量调整的过程中,管内介质会产生水击、压力冲击等现象,造成管道内部压力频繁剧烈波动,反复的交变载荷会持续加剧管道材料疲劳,扩大原有微小结构缺陷。天然气介质中含有的微量水分、硫化物、固体粉尘等杂质,会对管道内壁产生冲刷磨损与化学腐蚀,长期作用下会造成内壁破损、管壁减薄、局部坑蚀等问题。管道运行过程中出现的介质流速异常、局部堵塞等工况问题,会导致管内压力分布不均,局部高压区域超出管道设计承载极限,引发结构破损。另外,法兰、阀门、接头等管道连接部位属于结构薄弱区域,长期受介质冲刷、压力波动影响,极易出现密封松动、垫片失效、接口渗漏等问题,是管道泄漏的高发位置。

3 天然气管道主流泄漏检测技术

3.1 直观检测技术

直观检测技术是当前天然气管道日常运维体系中应用最广泛的基础泄漏检测手段,依托运维人员人工目视排查、感官辨识搭配简易辅助工具完成全流程作业,整体操作门槛低、设备投入成本少,现场调度灵活度高。该技术的核心作业逻辑为运维人员沿管廊带排查管道外观状态,识别管体局部变形、防腐层大面积脱落、连接接口松动移位、管壁显性破损等表层异常问题,同步结合嗅觉辨识天然气加臭后的特征气味、对疑似点位涂抹肥皂水观测发泡现象等标准化简易操作,快速定位泄漏特征明显的故障点位。直观检测无需配置高精度专业检测设备,适配架空管道、厂区内部短距离可视管道的日常周期性巡检场景,可快速排查泄漏量较大、特征明显的显性故障。但该技术存在明确的应用局限性,检测结果的可靠性高度依赖运维人员的作业经验,仅可识别暴露于外部环境的可见泄漏,无法检出埋地隐蔽管段的微小渗漏,整体检测精度偏低,也不支持全天候连续在线监测,在完整的检测体系中仅可作为辅助性检测手段使用^[3]。

3.2 仪器传感检测技术

仪器传感检测技术是现阶段天然气管道泄漏在线监测的核心技术,依托各类高精度传感器实时采集管道运行参数,通过参数异常分析实现泄漏识别与定位,检

测精度与时效性优势显著。该技术主要包含流量传感检测、压力传感检测、气体浓度传感检测三类核心方式,核心原理为利用传感器全天候采集管道进出口流量、管内压力、周边天然气浓度等运行数据。当管道发生泄漏时,管内介质流失会造成进出口流量差值异常、管内压力骤降,泄漏区域天然气浓度会快速升高,系统通过捕捉参数突变信号,即可精准判断泄漏故障并完成点位定位。该技术可实现24小时不间断在线监测,能够识别微小泄漏隐患,适配长距离、高压密闭输送管道。不同传感器具备差异化适配场景,多类传感器联动使用,可有效规避单一检测方式的误差,大幅提升泄漏检测准确率。

3.3 声波与红外检测技术

声波检测与红外检测属于高精度无损检测技术,主要用于排查隐蔽性泄漏、早期微小泄漏隐患,适配埋地管道、复杂工况管道的精细化检测场景。声波检测技术的核心原理为:天然气从破损点位泄漏时会产生特定频率的振动声波与湍流信号,通过专业声波采集设备捕捉管体及周边的声波信号,过滤环境噪音干扰,通过信号特征分析即可判断泄漏位置与泄漏量级,对早期微渗漏隐患识别能力极强。红外检测技术依托天然气与空气的红外辐射特性差异,利用红外成像设备扫描管道覆盖区域,泄漏扩散的天然气会形成差异化成像区域,直观呈现泄漏点位与扩散范围。两类技术均为非接触式无损检测方式,不会对管道结构造成损伤,检测范围广、定位精度高,可有效弥补常规在线检测与人工巡检的盲区,多用于管道定期深度隐患排查。

4 天然气管道安全防护与泄漏防控措施

4.1 优化管道本体防护体系

强化管道本体全生命周期防护,是从源头降低天然气管道泄漏风险的核心手段,可系统性提升管道结构稳定性与抗腐蚀能力,从根本上减少结构性失效概率。

(1) 日常运维阶段,需严格按照油气输送管道运维规范定期对管道外防腐层、保温层开展全覆盖排查与缺陷修复,及时对老化、开裂、脱落的防护结构进行补口补伤,完全隔绝土壤、地下水、大气等外部腐蚀介质与管道金属基体的接触路径,避免电化学腐蚀、微生物腐蚀持续侵蚀管材。针对焊缝、法兰接头、调压阀门等结构薄弱部位,建立专项排查台账开展常态化定向巡检,及时更换老化失效的密封垫片、填料等构件,对出现松动位移的接口进行重新紧固校验,提升管道整体密封性能。(2) 按固定周期开展管道壁厚超声波检测、对接焊缝无损探伤检测,精准掌握管道老化速率与内部缺陷扩展情况,对损伤超标、缺陷持续扩张的老旧管段及时纳

入更新改造计划,彻底消除结构性安全隐患。同步严格管控管道运行工况,建立运行压力动态监测机制,严禁超设计压力、超负荷长期运行,减少交变载荷对管道结构的疲劳损伤,延缓管道整体老化速率,保障管道长期运行的结构安全^[4]。

4.2 构建常态化智能检测机制

整合多类检测技术的差异化优势,建立覆盖全管段的多维度常态化智能检测体系,可实现天然气管道泄漏隐患的早识别、早预警、早处置,大幅降低泄漏事故的发生概率。(1)日常运维过程中采用人工巡检与智能在线监测深度融合的作业模式,通过持证运维人员的定点直观巡检,排查管道周边第三方施工破坏、外露管段显性破损等表层安全问题;依托分布式光纤传感、压力流量采集终端、可燃气体浓度监测装置搭建的在线监测系统,实现管道运行参数的全天候不间断采集,动态掌握全管段的实时运行状态。(2)定期采用声波检漏、红外热成像等高精度专项检测技术,针对埋地管段、穿跨越隐蔽管段开展精细化深度隐患排查,有效弥补常规人工巡检与在线监测的覆盖盲区。建立标准化全生命周期检测数据台账,持续记录管道实时运行参数、隐患点位坐标、闭环处置全流程信息,通过多周期数据交叉对比分析,精准掌握管道损伤的累积演化规律,推动运维模式从传统被动故障排查向主动隐患预判转型,全面提升天然气管道安全防控的科学性与前瞻性。

4.3 强化运行工况与环境管控

稳定管道内部运行工况、全维度管控外部环境风险,可系统性规避各类诱发天然气管道泄漏的内外源隐患,构建全场景的安全运行保障屏障。(1)在内部运行工况管控层面,严格规范管道启停作业、压力调节、输量动态调整的全流程操作标准,规避压力骤升骤降、水击冲击等异常工况的出现,保证管道运行参数长期处于设计允许的平稳区间,减少交变载荷反复作用造成的管道结构疲劳损伤。按运维周期开展管道清管作业,彻底

清理管内长期积存的积水、粉尘与固相杂质,降低介质长期冲刷与内壁电化学腐蚀对管材的损伤速率,维持管道内部工况的长期稳定。(2)在外部环境管控层面,针对土壤腐蚀性等级较高的埋地管段,通过增设绝缘防护垫层、优化阴极保护运行参数等技术手段,将管道阴极保护电位稳定控制在规范允许区间内,有效降低土壤对管道外壁的腐蚀速率。同步强化管道周边的空间防护管控,定期排查管廊带区域的地面沉降、土体位移等地质隐患,严格管控第三方施工活动,规避重型机械撞击、土体无序扰动等外力破坏行为,为管道长期运行提供稳定可控的外部环境^[5]。

结束语

天然气管道的安全运行与泄漏防控是覆盖全生命周期的系统性工程,绝非单一技术手段可独立实现。从源头强化管道本体防护,依托多技术融合的智能检测体系实现隐患早发现,同步做好内部工况与外部环境的全维度管控,三者协同形成完整的安全管控闭环,可系统性降低管道泄漏风险。随着管道运维技术的持续迭代,全链条、智能化的安全管控模式将成为行业主流,为我国天然气输送网络的长期稳定运行筑牢坚实的安全屏障,充分保障能源输送的可靠性与公共安全。

参考文献

- [1]安志强.天然气长输管道材料及施工质量对运行安全的影响分析[J].石化技术,2024,31(4):134-136.
- [2]周圣杰.天然气管道泄漏事故与对策分析[J].当代化工研究,2024(15):129-131.
- [3]李焯,刘洋.天然气管道设备静密封与无泄漏管理分析[J].石油石化物资采购,2024(20):61-63.
- [4]李俊,张家瑞,范斌斌,马天,王振,翟小伟.埋地天然气管道泄漏振动信号传播特性研究[J].石油机械,2024,52(1):138-144.
- [5]任彪.长输天然气管道建设安全管理中数字化技术的运用分析[J].石油化工建设,2024,46(9):69-71.