

天然气输配过程中泄漏检测技术的研究进展

郝建锋 (山西华新中昊天然气有限公司, 山西 晋城 048100)

摘要: 天然气, 作为一种环保、高效率和低碳的能源形式, 已经在日常生活、工业生产和交通运输等多个领域得到了广泛的应用。天然气管道, 作为天然气传输的核心通道, 其安全性问题始终是大家关心的焦点。鉴于天然气管道可能存在的泄漏风险, 为确保广大人民和环境的安全, 采用天然气管道泄漏检测技术显得尤为关键。

关键词: 天然气输送; 检测技术; 泄漏

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 027-0118-03

Research progress on leakage detection technology in natural gas transmission and distribution process

Hao Jianfeng (Shanxi Huaxin Zhonghaosheng Natural Gas Co., Ltd., Jincheng Shanxi 048100, China)

Abstract: Natural gas, as an environmentally friendly, efficient, and low-carbon form of energy, has been widely used in various fields such as daily life, industrial production, and transportation. As the core channel for natural gas transmission, the safety of natural gas pipelines has always been a focus of concern for everyone. Given the potential risk of leaks in natural gas pipelines, it is particularly crucial to adopt natural gas pipeline leak detection technology to ensure the safety of the general public and the environment.

Keywords: natural gas transportation; Testing technology; leak

天然气长输管道长期安全运营是天然气管道企业为之奋斗的方向, 而天然气长输管道运营时, 受到管道质量, 地形等因素影响、管道的腐蚀和其他因素的作用诱发了天然气的泄漏并造成了严重的后果。天然气长输管道所处的环境具有多样性的特点, 目前对天然气管道泄漏的检测与定位尚无普适的方法。因此, 探讨天然气管道泄漏检测的高效技术并准确定位上报事故信息在生产中有十分重要的意义。

1 天然气长输管道概述

目前我国已经建成了多条天然气长输管线, 并将陆续建设大量的支线和干线管道。采用长距离管道进行天然气传输的成本相对较低, 管道运输具有较高的安全性和大量的运输量, 能够满意地满足沿途用户的各种需求。泄漏发生的风险相对较低, 不容易引发环境污染, 并且不会产生废气排放, 从而实现了绿色环保的气体传输效率。因此, 长距离输气管道成为我国重要的能源战略资源之一。长距离的输气管道系统容易实现自动化控制和管理。例如, 天然气的数字化管道建设、场站和阀室的控制都采用了SCADA系统。这种系统能够对长距离输气管道进行实时监控和管理, 确保管道的安全运行, 实现远程监控和管理, 降低了员工的劳动强度, 并提高了天然气管道输送的效率^[1]。

长距离的天然气传输管道构成了一个封闭的传输系统, 有效地减少了天然气的损耗。天然气管道在整

个输送过程中, 始终处于高压状态下。由于在这种高压条件下, 天然气容易产生水合物, 造成天然气管线堵塞, 引起一系列问题。尽管没有液体管道传输带来的冲击风险, 但如果天然气管道发生破裂, 这将会引发大规模的天然气泄漏, 并可能触发严重的安全问题。如果输气管道出现泄漏问题, 不仅会影响人们的生活质量, 还会造成重大的经济损失, 甚至威胁到人民群众生命安全。因此, 对于长途的天然气输送管道, 进行泄漏的检测是至关重要的, 以避免各种安全事故的发生。

2 天然气长输管道泄漏原因

2.1 锈蚀

长输天然气管线是由金属制成的, 长期与大气、土壤、天然气等介质长触, 不可避免地会发生腐蚀。长距离输气管线在服役过程中, 由于受侵蚀, 长距离输气管线会逐渐变薄, 并产生大范围的变形, 从而产生直接渗漏, 给管线的安全运行造成了很大的不便, 所以应尽可能地减少这类腐蚀。

2.2 裂缝渗漏

在天然气长输管线建设中, 常用的连接形式是焊接连接。在这种情况下, 管线在焊接连接时, 由于没有对焊接质量进行检查, 容易出现渗漏。其主要表现在: 在管线焊接过程中, 由于焊接工人的专业技术水平不够, 或者是焊缝质量有问题, 导致在焊接后的管线施工过程中产生裂纹, 最后导致管线渗漏, 这对工

程施工质量有很大的影响，会导致重大的安全事故。

2.3 外因的破坏

在长距离输气管线中，除了自身的缺点以外，还存在着许多外部因素。比如，在建设期间，管线埋置太浅或者太深，管线在建设中受到损伤，管线本身存在的质量问题，都会对管线的安全性造成影响。此外，还有第三方的破坏，一些不法分子故意对长距离输气管线进行破坏，造成输气管线无法正常运行。上述几点是输气管线经常遇到的问题，也是造成输气管线运行不稳定的主要原因。

3 天然气长输管道泄漏检测技术

3.1 流量检测技术

依据质量守恒定律，物质在转化或传递时，总量不会因形式变化而增减。在天然气长输管道中，当处于常稳定压力境时，单位时间内管道输送的流量应保持稳定。基于这一原理，通过监测管道两端的瞬时流量数据，对比进出量的差异，就能判断是否存在泄漏。比如某条长输管道的首站每小时输气量为 8 万 m^3 ，若末站同期接收量持续低于 7.8 万 m^3 ，且排除压力调节等正常波动因素，就可判定管道存在泄漏^[2]。

不过，这种技术的局限性也很明显。它只能确认“是否泄漏”，却无法确定具体位置。例如在一条穿越多座城市的长输管道中，即便检测到流量差，也难以区分泄漏点是在山区段、农田段还是城镇段。因此，实际应用中通常需要与其他技术配合，比如先用流量检测锁定存在泄漏的管段，再用定位技术缩小范围。某天然气公司的实践就显示，将流量检测与压力监测结合后，泄漏排查效率提升了 40%。

3.2 负压波法

当天然气发生泄漏时，泄漏点周围会因介质流失出现局部密度下降，进而产生瞬时压力骤降和流速变化，这种压力波动会以声波速度向泄漏点上下游传播。以泄漏前的稳定压力为基准，这种减压波动就被称为负压波。就像水管破裂时，缺口处会瞬间形成压力低谷，这个信号会沿着管道快速扩散，传播速度通常在 300–450m/s。

管道上下游安装的压力传感器会捕捉到这种压力突变^[3]。假设泄漏点距离上游传感器 10km，距离下游传感器 15km，负压波先到达上游传感器，12s 后到达下游传感器，结合 350m/s 的传播速度，就能通过时间差计算出泄漏位置。目前常用的定位方法包括相关分析法(对比上下游信号的相似性)、时间序列分析法(建立压力变化模型)和小波变换法(提取突变信号特征)。某输气管道曾通过小波变换法，在压缩机运行的干扰信号中精准识别出泄漏产生的负压波，成功定位了一

个直径 5mm 的小孔泄漏。

3.3 声波检测技术措施

声波检测技术的核心是利用泄漏时产生的声波特性判断管道状态。当天然气从管道泄漏时，由于内外压差较大，高速喷出的气体会引发湍流，产生不同频率的声波——小口径泄漏可能发出高频超声波，大口径破裂则伴随低频轰鸣。这些声波既能通过管道内的天然气介质传播，也能沿着管壁扩散到上下游^[3]。

传感器捕捉到声波信号后，传输至分析系统，通过信号的频率、强度和持续时间判断泄漏情况。例如在某高压长输管道检测中，声波传感器监测到持续的 15–20 千赫兹高频信号，经分析确认是阀门接口密封不良导致的微量泄漏，后续维修时果然发现密封垫片存在裂纹。该技术的优势在于响应迅速，从声波产生到传感器报警通常不超过 10s，能大幅减少天然气损失。某案例中，声波检测技术使泄漏发现时间较传统方法提前了 2h，减少泄漏量约 300m³。

4 新兴泄漏检测技术的探索

4.1 微型机器人检测技术

用于管线内的检查，可以用于狭窄的空间和复杂的管网。这种机器人一般是模块化的，一般直径 5–15cm，可以在超过 30cm 的管道中自由穿行，哪怕是 90 度的弯头、三通等复杂构造，也能轻松通行。它的机体采用了履带式或螺旋式推进式，既能适应管道内壁的起伏，又能在有水、油等恶劣环境下工作。该方法可在不开挖管线的情况下，进行埋地管线或长输管线的隐藏处，不影响地面交通及正常生活。

近几年来，在机器人的运动控制方面有了重要的突破。课题组研发的“蛇型机器人”，通过模拟人体生理活动，在弯曲半径只有管子直径 1.5 倍的情况下，可实现 98% 的转向精度，比传统的刚性机器人提高 30%。在感测器整合上，HD 摄影机已经由 1080P 提升到 4K，搭配 360° 可转动的云台，可以捕捉到管道内壁 0.2mm 的微小裂缝；它所携带的甲烷探测器可以对天然气进行实时监测，并在泄漏率高于 0.01% 的时候发出报警^[4]。另外，一些机器人还增加了磁场定位功能，利用安装在管线外面的基站，可以精确地把自己的位置误差缩小到 1m 以内，从而精确地标示出泄漏点。

针对城市旧管网的内部腐蚀与渗漏问题，已取得阶段性成果。到 2023 年，南方某新建 20 年的天然气管道，在巡视期间，10 个微型机器人 72h 完成了对 50km 管道的全方位检测，发现 3 处因腐蚀导致的针孔渗漏，12 处管壁减薄区。但是，如果采用传统的手工开挖方式，在相同的道路上开挖，耗时一个多月，

损毁的道路将超过 15 条。某能源公司在远距离管道检测过程中，使用机器人对穿越黄河的管道进行了检测，通过对管道的冲蚀研究，揭示了管道因水流的冲刷而产生的“松弛”现象，可有效避免管道发生大范围渗漏。但目前该方法仍受限于直径小于 30cm 的支管，当遇到大颗粒（如岩石、凝结物等）时，手臂难以伸进，且极易发生卡阻，有待进一步优化。

4.2 无人机巡检技术

适合大面积、复杂地形条件下的管网外漏探测。该无人机可携带各种探测装置，可在 100–300s 高空自由飞行，且不受限于地形，可在陡峭的山地、沼泽湿地、城区建筑等区域进行快速探测。它的续航能力一般为 1–3h，再加上地面基站的中继，可以实现 50 km 的管线巡视，效率比手工巡检快 8–10 倍。另外，在小雨、大雾等恶劣天气条件下，利用红外热像仪进行漏泄探测，可以有效地弥补手工巡检的不足。

多传感器协作探测是当前的研究热点。某公司研制的“天眼”无人驾驶系统，采用红外热像仪、激光甲烷探测器、瓦斯取样泵等多种探测手段，利用红外成像技术，探测温度不正常区域（泄漏点由于气体膨胀而降低 5–8℃），利用激光对疑似区域进行精确扫描（探测范围达到 100m，以 0.1ppm 的精度），而瓦斯取样泵采集大气样品再次确认，三种信息融合后，识别准确度达到 95%。

在路径规划上，本项目拟采用自主导航方法，通过与管线 GIS 地图相结合的方式，实现对线路的优化，避开高压输电线路、建筑等障碍物，并在遭遇电池电量不足、信号中断等意外状况时，实现自动返回，比手动控制方式降低 40% 以上。

2024 年，北方某天然气公司对全长 200km 的山区输气管道进行巡检，传统人工巡检需 20 人分 5 组，耗时 15 天，成本约 30 万元；改用 3 架无人机巡检后，仅需 3 名操作员，3 天完成全部检测，总成本（含设备租赁、人员薪酬）约 12 万元，成本降低 60%，效率提升 80%。

在某沿海城市的管道检测中，无人机通过红外热像仪发现一处埋深 1.5m 的泄漏点——该区域因潮汐影响常年积水，人工巡检多次漏检，而无人机凭借热成像技术清晰捕捉到水下泄漏形成的温度异常区，为维修节省了大量排查时间^[5]。不过，无人机检测也存在局限性，如在茂密林区，树叶遮挡会影响红外信号接收，需配合地面人员手持设备二次核验，这会增加约 15% 的额外成本。

4.3 量子点传感技术

利用量子点对天然气组分具有特定的荧光响应特

性。量子点是一种直径只有 2–10nm 的纳米半导体，它的发光性质会随着外界气体组分的不同而发生变化，尤其是在遇到天然气中的甲烷时，荧光会发生明显的衰减，并且衰减的幅度与甲烷的浓度成正比。在此基础上，利用荧光信号的变化，可以精确地识别出气体的泄漏。该方法的优点是具有非常高的灵敏度，可以在 0.001% 的条件下进行探测，大大突破了常规传感器的检测极限。

在此基础上，研制出高灵敏量子点传感器。本项目以 CdSe 量子点为研究对象，利用 CdSe 量子点与石墨烯复合，通过对量子点尺寸及表面改性，实现对甲烷气体的快速检测，达到 0.5s 以内，比纯量子点提高 60%；同时，在二氧化碳、硫化氢等气体共存的情况下，对甲烷的特异性识别能力提高 60%。在室内试验中，其对管线内微小渗漏的探测精度达到 99%，且在湿度 90%、温度 -10–50℃ 等极端环境下，其灵敏度下降幅度小于 5%。

还有一种方法是在一层柔韧的薄膜上制作“电子皮肤”，使其可以附着在管子的表面，在管子出现渗漏时，可以在 10 秒钟之内发出荧光警报，这是一种新的监控方法。但这一技术尚处在实验室研究阶段，其关键问题是：长时间暴露于大气中易发生氧化，使其发光性质退化，其使用寿命只有 3–6 个月，量产成本高（单片 200 元），需要对材料制备工艺进行进一步优化。

5 结束语

综上所述，从总体上看，远距离输气管线的漏检技术正处于一个较好的发展阶段，是实现稳定增长、实现利润最大化的重要保证。其关键的应用有流量检测、声波检测、光钎检测和红外泄漏检测。在实践中，应针对不同测试单元的不同要求，合理地选用不同的测试方法，才能有效地提高测试结果的准确性。

参考文献：

- [1] 卢宏玉. 长输天然气管道泄漏检测技术 [J]. 化工管理, 2018(10):97.
- [2] 张生, 丁艳林, 解铁成, 刘继锋. 长输天然气管道泄漏检测技术探讨 [J]. 化工设计通讯, 2017, 43(12):164–165.
- [3] 王克华. 天然气管道泄漏探测系统研究与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [4] 张秀. 微流量泄漏状态下输气管道泄漏检测技术 [J]. 山东化工, 2022(017):051.
- [5] 闫晓瑾. 输气管道泄漏检测技术及其发展趋势 [J]. 石油工业技术监督, 2022, 38(1):4.