

城市燃气管道泄漏检测与定位技术研究

边仙花¹ 孙雷² 郑锐²

1.北京松田程科技有限公司 北京 102400

2.浙江浙能燃气股份有限公司 浙江 杭州 310000

【摘要】：城市燃气管网作为保障现代城市能源供给的重要基础设施，其安全稳定运行直接关系到社会公共安全、经济有序运转及生态环境质量。随着我国城镇化水平快速提升，燃气管网规模不断扩大，系统复杂性日益增加，管道因腐蚀老化、第三方施工破坏、材料缺陷等原因导致的燃气泄漏风险持续存在，一旦发生泄漏，不仅可能引发火灾、爆炸等严重后果，还会造成资源浪费与环境污染。因此，如何实现对燃气泄漏的快速识别与精准定位，已成为城市安全管理领域的重点课题。当前，燃气管道泄漏检测技术正逐步从传统人工巡检向多技术融合、智能化与系统化的方向发展，各种方法各有其适用场景与发展潜力。为系统梳理现有技术路径及其发展趋势，本文对主流燃气管道泄漏检测与管道定位方法进行综述，涵盖从基于化学成分分析的光学检测，到基于声学、红外热成像、分布式光纤传感等多种技术原理的检测手段，并对其在实际应用中的优缺点与适用条件进行分析，以期提升泄漏检测效率、推动技术集成创新提供参考。

【关键词】：城市燃气；泄漏检测；定位技术；管道检查

DOI:10.12417/3083-5526.25.04.016

1 引言

城市燃气管网是维持现代城市能源供给的关键基础设施，其运行安全直接影响公共安全与环境风险。然而，由于部分管道服役时间较长、材质老化，加上外部腐蚀、第三方施工破坏等复杂因素，管道泄漏事故仍时有发生，不仅造成能源浪费，也可能引发火灾、爆炸等严重后果。为提升泄漏检测与预警能力，近年来多项新技术逐步投入应用。例如，结合车载激光扫描与嗅探犬的“光学-生物协同检测”方法，能够在较大范围内实现快速筛查与精确定位；基于北斗精准定位、物联网传感和人工智能的在线监测系统，可实时感知管网压力、气体浓度等关键参数，实现对泄漏风险的早期预警；此外，物理神经网络（PINN）等智能预测模型被用于模拟泄漏扩散过程，为应急响应提供支持。在管网更新与运维方面，非开挖修复、数字孪生平台等技术与智慧化管理模式也在逐步推广，进一步提升了燃气系统的韧性和安全水平。这些技术的发展与整合，为构建覆盖感知、预警、处置全流程的燃气安全防护体系提供了重要支撑。

2 国内外研究进展

无损检测技术作为现代管道安全管理的重要支撑，其核心价值在于能够在完全不损伤管道结构的前提下，精准识别内部及表面的各类缺陷。随着技术持续进步，各类在线检测方法不断成熟，为管道系统的完整性评估与风险防控提供了强有力的技术工具。

在现有的无损检测方法中，射线检测、超声检测、磁粉检测、涡流检测等均已成为行业标准手段。每种技术各有侧重，例如超声检测对确定内部缺陷的尺寸和位置有优势，而磁粉检测则对铁磁性材料表面和近表面缺陷灵敏度高。选择何种方法

需综合考虑管道材质、缺陷可能类型、运行工况以及现场环境等多重因素。当前技术发展正朝着多技术融合、智能化和自动化的方向演进，例如通过与人工智能结合实现数据的自动分析与缺陷识别。

值得注意的是，我国部分城市燃气管网已运行超过 20 年，管道材质老化、防腐层破损、阴极保护失效等问题逐渐显现，存在因腐蚀导致泄漏的风险。同时，随着城市规模快速扩张，燃气管网系统日益复杂，这进一步加大了安全运维的难度。面对这一严峻挑战，国家层面已出台专项政策，指导各地系统性地开展燃气管道老化评估工作，旨在精准识别风险并有序推进更新改造。

3 检测方法

3.1 泄漏检查

为确保城市燃气管网运行安全，需要对穿越段、阀门、阀门井、法兰、补偿器、调压装置及套管等关键部位进行系统性泄漏检查。若在检查过程中发现接口处有气泡持续产生、周边植物异常枯黄、能听到气体泄漏声或闻到明显异味等现象，需立即对该位置做进一步核实。当怀疑燃气可能渗入地沟、窨井、铝板幕墙内部或其他地下密闭空间时，也应对这些区域展开详细排查。如果地面常规检测难以精确定位泄漏点，可结合实际情况，通过在地面钻孔取样辅助确认泄漏源。

3.2 防腐层整体质量状况

在评估管道防腐层的整体质量时，通常会采用电流衰减法。该方法先向管道输入特定频率的交流电，使管体产生感应电流。检测人员随后沿管线在地面上测量该电流所形成的交变磁场，分析其强度变化与分布规律。基于这些测量数据，并结合均匀传输线理论建立计算模型，便可进一步分析管道中电流

的衰减情况，从而评估防腐层的绝缘性能好坏。这项关键的电阻率指标（通常记为 R_g ，单位为 $k\Omega \cdot m^2$ ）可用于对防腐层绝缘质量进行定量分级评价。

表1 外防腐层电阻率 R_g 值 ($k\Omega \cdot m^2$) 分级评价

防腐类型	级别			
	1	2	3	4
3LPE	$R_g \geq 100$	$20 \leq R_g < 100$	$5 \leq R_g < 20$	$R_g < 5$

注：此标准中 R_g 值是基于线传输理论计算所得；电阻率是基于标准土壤电阻率 $10\Omega \cdot m$ 。

3.3 管道位置、走向和埋深检查

管道位置、走向与埋深的检查，通常涉及管道与其他建（构）筑物或相邻管线之间的净距是否符合安全规范、是否存在占压情况、管道是否有裸露段，以及周边土壤有无明显松动或沉降迹象。检查过程中，如发现任何异常点，需详细记录其具体位置、基本状况和现场检查结果。对于已经暴露在外的管段，应进行外观检验，重点查看防腐层是否完整、是否存在破损或脱落，破损处是否已导致管体金属直接暴露，以及管体表面是否有锈蚀等问题。

3.4 阴极保护检测

评估阴极保护系统的效果，关键在于对管地电位进行精确测量和细致分析，从而确认防护功能是否正常。根据技术规范，有效的阴极保护需满足特定的电位要求：测量得到的管地电位（相对于铜/硫酸铜参比电极，CSE）应低于 $-0.85V$ ，以确保足够的保护；但同时，为避免过保护可能对管道或涂层造成的损害，其电位也不应低于 $-1.2V$ 。维持在这一范围内是保障系统有效运行的基本条件。

4 案例分析

4.1 管线介绍

以某城市燃气公司 2024 年的数据为例，全年累计上报各类隐患 133 起。同年发生的管网事故中，立桩漏气最为常见，共发生 320 起，占事故总数的 75.65%（相关分布情况见图 1）。

目前，不少投入运营时间较长的居民区，其燃气管道及相关设施因自然老化所带来的安全风险日益凸显。为全面落实燃气安全排查整治工作要求，相关企业已显著强化日常巡检与系统排查力度，力求将潜在事故隐患控制在安全阈值之内。以下将以某城市燃气公司的一段中压与次高压管道检测结果为例展开分析。通过系统化的排查流程并结合多种辅助技术手段，该公司能够精准识别管网中的潜在风险点，并据此采取针对性处理措施，从而有效保障燃气管网的整体运行安全。

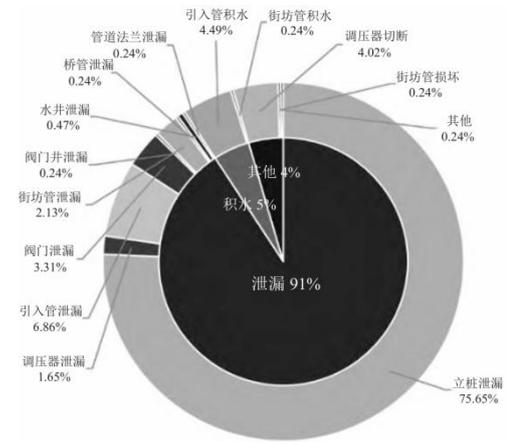


图1 某城燃公司 2024 年各类管网事故占比图

4.2 检测情况与结果

4.2.1 中压管道检验结果

本次检测的燃气管道总长度约为 41.9 千米，设计压力为 0.4 兆帕，实际运行压力约为 0.38 兆帕。管道全线未与排水管（沟）、供水渠、热力管沟、电缆沟、城市交通隧道、轨道交通隧道或其他人行地下通道等构筑物交叉或并排铺设。管道主要铺设在绿化带、非机动车道及机动车道下方。在评估其埋设深度时，我们以 0.3 米、0.6 米和 0.9 米三个深度基准进行了分析。检测过程中使用了专业的管道电流测绘系统，精确测量了管道的实际位置、埋深及走向。

以其中一段位于非机动车道和人行道的 A 管段为例进行分析，该段管道埋深在 0.77 至 1.94 米之间，符合规范要求。从防腐层状况来看，部分管段（178 米，占可评价长度的 9.60%）防腐层质量被评定为“一般”等级，表明已出现一定的腐蚀迹象，需加强防护措施；另有 51 米（占比 2.75%）防腐层质量属于“差”的级别，建议尽快进行修复或更换，以防止安全隐患进一步扩大。埋深图如图 2 所示。

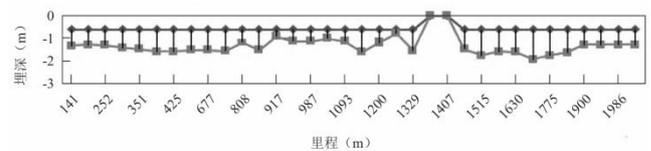


图2 A 管段埋深分布图

本次对 A 管段的外防腐层检测综合采用了电流衰减法（PCM）与交流电压梯度法（ACVG），如图 3 所示。该管段总长度约 1996 米，其中可进行有效评价的管段长度为 1855 米。检测结果显示，防腐层质量存在明显分级：约 60.43%（1121 米）的管段防腐层质量等级为 1 级，表明这些区段的防腐保护效果良好，能有效抵抗外部腐蚀。等级为 2 级的管段占 27.22%（505 米），其保护性能有所下降，需安排定期维护。另有 9.60%（178 米）的管段被评为 3 级，已存在初步腐蚀迹象，有必要采取修补措施以控制恶化。此外，还有 2.75%（51 米）的管段

为4级，防腐层质量较差，建议尽快修复或更换，以消除安全隐患。

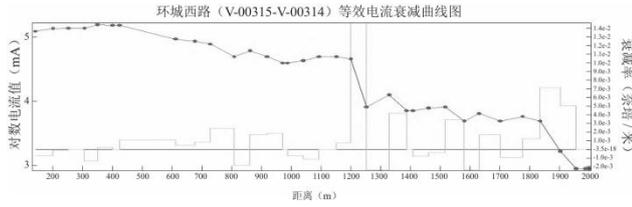


图3 A管段防腐层整体质量状况检测单频分段图

4.2.2 次高压管道检验结果

此次检测的燃气管道总长约36.8公里，设计压力为1.6兆帕，实际运行压力通常在0.8兆帕左右。该管道全程未与排水管(沟)、供水管渠、热力管沟、电缆沟、城市交通隧道、轨道交通隧道或地下人行通道等其他地下设施交叉或并排铺设。管道主要铺设在绿化带、非机动车道及机动车道的下方。在评估埋深时，分别以0.3米、0.6米和0.9米作为参照深度进行分析。检测中运用了专业的管道电流测绘系统，准确确定了管道的实际位置、埋设深度和走向。以其中一段位于非机动车道和绿化带的B管段为例，其实际埋深在0.95米至1.32米之间。该管段中埋深较大的区段为管道穿越部分，经核实，所有埋深数据均符合规范要求。具体的埋深分布情况见图4所示。

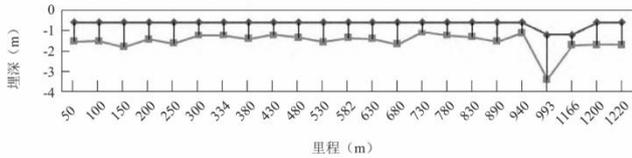


图4 B管段埋深分布图

对B管段的外防腐层检测采用了电流衰减法(PCM)与交流电位梯度法(ACVG)相结合的方式。检测结果显示，该管段总长约1220米，其中可有效评价的长度为1170米。从防腐层质量分级来看，高达91.37%(1069米)的管段其防腐层质量等级为优(1级)。此外，另有8.63%(101米)的管段防腐层质量等级为良(2级)。

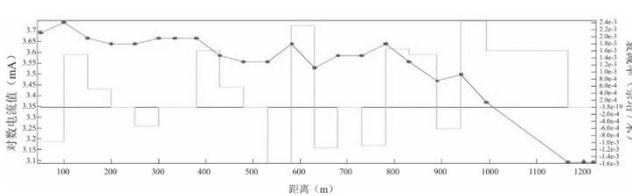


图5 B管段防腐层整体质量状况检测单频分段图

参考文献:

[1] 丁鸽, 孙傲. 基于机载LiDAR技术的城市地下排水管道泄露点检测方法[J]. 城市勘测, 2023(5): 170-174.
 [2] 宋晓燕, 李啸然. 燃气管道泄漏爆炸应急救援物资需求及救援点优化选址研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(3): 1136-1142.
 [3] 程玉峰, 李振宇. 基于车载激光与嗅探犬协同的燃气管网甲烷泄漏检测技术[J]. 城市燃气, 2025(3): 45-50.
 [4] 严荣松. 城镇燃气管道泄漏检测技术分类与智能化趋势分析[J]. 煤气与热力, 2021, 41(10): 32-38.

4.3 检测结果分析

4.3.1 中压管道检验结果

检查人员对管道沿线的阀门井和地面标识进行了全面排查。现场共查看了309座阀门井，所有井体结构、内部设施及井盖均保持完好，但部分管道沿线存在地面标识缺失的情况。经实地勘查，检查范围内未发现管道被占压、周边土壤松动或第三方施工的痕迹。部分区域观测到深根植物的生长。使用可燃气体检测仪对管道全线进行了泄漏排查，结果均未显示异常；相关调压柜的压力控制上限设定为0.38 MPa。在防腐层状况评估中，应用了交流电压梯度法进行检测。结果显示，大部分管段的防腐层状态良好，但部分管段存在不同程度的腐蚀风险。后续将根据具体的质量评估等级，对相应管段采取必要的维护措施。通过214处测试桩的牺牲阳极断开法测量，管地电位(相对于CSE)在-0.8507 V至-1.1991 V之间，符合阴极保护有效性规范要求，表明阴极保护系统运行正常，能够有效防护管道。

4.3.2 次高压管道检验结果

对本次检查范围内的全部管道沿线进行了勘查，没有观察到管道被占压、周边土壤明显松动或存在第三方施工作业的情况。该段管道全部处于深根植物生长的区域内。此外，重点对铸铁管连接处、非金属管道的熔接口(包括钢塑转换接头)等关键节点进行了地面泄漏排查，并使用可燃气体检测仪对整个管道沿线及阀门井进行了细致检测，所有结果均显示无泄漏。系统控制限压设定为0.8 MPa，以保障运行安全。防腐层破损点检测为评估管道外防腐状况提供了重要依据，整体来看，受检管道的外防腐层质量良好。需要说明的是，在阳极附近区域，因地电场对微小破损点的屏蔽效应，部分较小缺陷可能未被检出，同时现场环境与仪器限制也可能影响个别漏点的识别。此外，通过53处牺牲阳极测试桩的管地电位测量，得到相对于CSE的电位值在-0.8710 V至-1.1866 V之间。

结语

城市燃气管道泄漏检测是保障公共安全的关键领域，其研究方法正朝着多技术融合与智能化方向发展。当前主流技术各有特点，融合多种方法能有效提升检测的全面性和准确性。未来研究的重点在于加强传感器技术与机器学习算法的可靠性，并探索区块链、物联网等新技术的应用潜力。通过多技术协同、算法优化与新工具引入，可进一步提高检测的精准度和实用性，从而为燃气管网的安全运行提供更加坚实的保障。