

Application of Tracer Gas Leak Detection in Water Supply Pipeline and Its Adaptability to Complex Geology

Jieke Zhao Qiuchan Chen Yi Zhan Wenbo Ma

Wenzhou Public Utilities Development Group Yueqing Water Supply Co., Ltd., Yueqing, Zhejiang, 325600, China

Abstract

To address the challenges of uneven leakage distribution and detection difficulties in water supply networks across typical scenarios including coastal saline-alkali land, urban paved roads, and mountainous green spaces in Yueqing City, this study developed a tracer detection technology using a 95% nitrogen and 5% hydrogen gas mixture. Through systematic analysis of tracer gas diffusion paths, permeation rates, and concentration decay characteristics under various geological conditions, the research optimized detection point density, sampling frequency, and parameter configurations, followed by multi-regional pilot validation. Results demonstrate that this technology can accurately locate concealed leakage points, significantly improving detection efficiency and precision. It provides scientific support for refined leakage control in water supply networks, demonstrating substantial engineering application value.

Keywords

water supply network; gas tracer leak detection; leakage control; geological adaptability

供水管网示踪气体检漏应用及复杂地质适应性研究

赵杰克 陈秋蝉 詹毅 马文波

温州公用事业发展集团乐清水务有限公司, 中国·浙江 乐清 325600

摘要

针对乐清市沿海盐碱地、城区硬化路面、山地绿化地等典型场景下供水管网漏损分布不均、检测难度大的问题,本研究研发基于95%氮气与5%氢气的混合介质示踪检漏技术。通过系统分析示踪气体在不同地质条件下的扩散路径、渗透速率及浓度衰减特性,优化检测布点密度、采样频次与参数配置方案,并开展多区域试点验证。结果表明,该技术可精准定位隐蔽漏点,有效提升管网漏损检测效率与精度,为供水管网精细化漏损控制提供了科学技术支撑,具有重要的工程应用价值。

关键词

供水管网; 气体示踪检漏; 漏损控制; 地质适应性

1 引言

随着经济社会的发展,对供水需求量不断深化,管道的布置也日益复杂紧密。自来水管网漏水时,准确定位漏点成为一项技术上的难题。作为一项民生工程,多地供水测漏部门不断强化学习,掌握并通过科学的检测技术,确保供水安全。

2 项目背景与核心技术

2.1 项目背景

2015年4月2日,国务院发布《水污染防治行动计划》(简称“水十条”),再次强调,到2020年,全国用水量控制在6700亿 m^3 以内。并进一步明确提出加强城镇节水,对使用超过50年和材料落后的供水管网进行更新改造,

到2017年,全国公共供水管网漏损率控制在12%以内;到2020年,控制在10%以内。到2025年,全国城市公共供水管网漏损率应控制在9%以内。

乐清市现有DN75以上市政供水管道总长约4300多公里,其中球墨管占比约7%、钢管占比约24%、PE管占比约21%、砼管占比约5%、钢塑等其他材质管道占比约43%。2022至2024年,乐清水务年度产销差(产销差率是衡量管网漏损的核心指标,主要由漏失率及计量误差构成)均稳定控制在10%以下,但漏损分布呈现显著不均性。部分区域由于管网复杂、管道健康度低、PE管材占比高、管道埋深较大等原因,产销差率仍高于10%阈值,传统听声法检漏法、流量监测法等技术手段因定位精度有限,已难以满足精细化漏损控制需求。

针对传统检测手段(人工听漏、声波检测)的短板:高度依赖漏水点发出的声音来判断漏水点的准确位置,对于微小渗漏、水包管等漏水点根本无法检测。项目核心研发目

【作者简介】赵杰克(1989—),男,中国浙江乐清人,本科,助理工程师,从事地理信息管理研究。

标明确为：研发落实一套“高效、精准、实用”的供水管网气体示踪检测方法，从技术原理、操作工艺、场景适配等多维度突破传统技术瓶颈，为乐清市不同地质条件、不同管材类型、不同工况场景下的供水管网检漏提供系统性解决方案。

2.2 技术原理

采用 5% 氢气与 95% 氮气组成的安全混合气体作为示踪介质，利用氢气小分子结构、低密度的物理特性，使其从管道漏点快速垂直渗透至地表；通过搭载灵敏度达 1ppm、响应时间 ≤0.5 秒的高精度氢气传感器，沿管线上方区域进行扫描检测，定位气体浓度峰值点即可实现漏点精准定位。该混合气体具备无毒、无腐蚀、无可燃性等特性，对管道材质、土壤生态及人体健康均无不良影响。

操作过程中，通过消防栓、排气阀等现有接口注入气体，结合 GIS 管网数据，依据“ $P_{\text{气瓶}} \times V_{\text{气瓶}} = P_{\text{管道}} \times V_{\text{管道}}$ ”公式（等温条件下，基于理想气体状态方程简化推导），根据管道长度、口径及压力精准计算气体用量；注入过程中同步在管道末端排气并实时监测气体浓度，确保气体均匀覆盖检测区域管道，大幅缩短停水时间（单次检测停水时间控制在 2-4 小时）。

3 地址条件与气体扩散特性分析

气体示踪技术以氢氮混合气（95% 氮气 +5% 氢气）为核心示踪介质，通过向管道注入气体并追踪地表逸出信号定位漏点，其检测效果直接依赖于气体在不同地质环境中的扩散行为。地质条件的土壤结构、含水率、地表覆盖等差异，会显著改变气体的扩散速度、路径及稳定性。针对沿海盐碱地、城区硬化路面（混凝土、沥青）、绿化地等三类典型场景，系统解析气体扩散特性，为现场检漏提供技术支撑。

3.1 示踪气体的固有属性

主流氢氮混合气具有分子量小、扩散系数高、无毒无味无腐蚀性的特点，这些属性决定了其“易逸散、易追踪”的核心优势，但也使其扩散行为极易受外部地质环境干扰。气体扩散的本质是沿介质孔隙迁移，地质介质的孔隙率、连通性、含水率直接决定了扩散阻力与迁移方向，这是分析不同场景扩散特性的核心逻辑^[1]。

3.2 扩散特性分析

3.2.1 沿海盐碱地

土壤结构以黏质土或粉质土为主，颗粒细且排列紧密，孔隙率仅 20%-30%，含盐量相对较高，易导致土壤板结，孔隙连通性差。土壤含水率高，部分区域形成盐渍不透水层，

直接阻断纵向通道。一定程度上受海水潮汐影响，地下水位周期性升降，会反复挤压、稀释气体，破坏浓度稳定性。

3.2.2 城区硬化路面

城区硬化路面以沥青路面和混凝土路面为核心，二者均呈现“致密层阻隔 + 有限通道逸出”的扩散特征，其中沥青路面因应用广泛且裂缝特性突出，成为分析重点。

沥青路面孔隙率 3%-5%，混凝土路面 < 2%，硬化层厚度 5-15cm，透气性极差，形成纵向扩散“绝对屏障”。但存在路面裂缝、井盖周边缝隙、路缘石接口、施工接缝等天然“逸出通道”。硬化层下多为回填土，孔隙率相对较高，排水条件良好，为气体横向扩散提供基础空间。

扩散速度与路径：纵向扩散几乎为零，需 4-6 小时到达远处透气通道；气体沿裂缝、井盖缝隙垂直逸出，形成“点状高浓度区”，漏点正上方无通道时，可能横向迁移数十米至绿化带二次逸出。

浓度分布规律：地表浓度呈“非连续点状分布”，裂缝密集区浓度峰值高，无扩散通道区域信号完全缺失；硬化层下气体浓度沿扩散方向逐渐衰减，形成“漏点 + 通道距离”的浓度梯度。如无天然“逸出通道”，需要路面钻孔辅助检测，浓度分布会根据钻孔密度而改变^[2]。

关键影响因素：路面裂缝和扩散通道密度是核心变量（裂缝和通道密度高 → 逸出点高 → 检测信号强）。因“热胀冷缩”特性，温度的变化对气体扩散存在一定影响，温度高会一定程度缩短气体到达通道的时间。同时，降雨天气会使路基含水率升高，雨水填充土壤孔隙导致扩散阻力增加，需避开降雨后 24 小时内检测。

补充特性：混凝土路面因孔隙率更低、整体性更强，裂缝出现概率低于沥青路面，扩散路径更集中于井盖和路缘石接口；其表面更光滑，气体逸出后不易滞留，需更快完成扫描检测，避免信号被风吹散。

3.2.3 绿化地

绿化地是气体示踪技术的“理想应用场景”，土壤孔隙发达、无地表阻隔，气体扩散呈现“纵向快速扩散 + 气体浓度稳定”的特征。

绿化地以壤土和沙土壤土为主，相比较盐碱地和硬化路面孔隙率最高，含有植物根系，孔隙连通性极佳，扩散阻力小。含水量适中，灌溉后短期积水但排水性好，无明显积水阻隔。无硬化阻隔，植物根系形成天然“逸出通道”，气体可直接垂直上升至地面。如表 1（核心特性对比）

表 1（核心特性对比）

对比方向	沿海盐碱地	硬化路面	绿化地
核心制约因素	高含水量、盐碱硬化层阻隔	硬化层屏障、透气通道有限	无明显制约
扩散主导方向	横向扩散 + 通道逸出	横向扩散 + 通道逸出	纵向
扩散速度	极慢	慢	快
定位精度	大（取决于通道密度）	中（取决于通道密度）	≤0.5m
检测等待时间	长	中	短

4 试点成果分析

4.1 试点区域地质条件分析

结合乐清供水管网分布特性，梳理 GIS 系统的管网资料，选定了多个试点地区，重点针对四类典型地质条件开展研究，其中以雁荡所（环山富岙支线）、乐成所（新市区支线）、虹桥所（镇小路支线）、经开区所（翁垟小微园支线）最具代表性。

项目在四类典型地质区域开展试点应用，累计精准定位并修复漏点 12 处，其中包含 6 处传统检漏方法无法识别的微小漏点（漏量 < 0.1 吨/小时）。

经实际检测，山地绿化型地质因土壤孔隙率高、无地表硬化阻隔，示踪气体扩散速度最快（1.5m/h），定位精度最高（≤0.5m），是气体示踪检漏技术的最优应用场景；沿海盐碱型地质受高盐高温环境的双重阻隔作用，气体扩散速度最慢，且信号稳定性最差，需针对性制定强化检测方案；城区硬化型地质受硬化层物理屏障影响，气体纵向扩散受阻，主要依赖路面裂缝、井盖缝隙、道路绿化带等透气通道逸出，检测时需优先排查此类潜在逸出窗口。

4.2 典型案例分析（经开区经八路）

该案例涉及经开区经八路支线（与表 3 中翁垟小微园支线为经开区不同供水管网支线，因地质类型相近被纳入同一类试点分析）。该区域为填海造陆形成，地质类型属沿海盐碱与硬化路面混合型，土壤高盐高温且硬化层阻隔，

导致气体渗透阻力极大。同时区域沉降现象突出，道路多次修复导致管网实际埋深较初始设计逐步增加。案涉支线为 DN110PE 管，总长 1200 米，设计埋深 1.2 米，敷设于非机动车道下方；管道沿线工厂密集，24 小时连续生产造成复杂环境干扰，传统听声检漏法受环境噪声及地质条件双重影响，信号衰减显著，难以精准定位漏点。

项目团队通过前期流量监测发现该支线数据异常，经系统分析核实确认存在持续性漏失，测算月漏水量约 4500 吨。

在当地水管所配合下，技术团队结合 GIS 管网数据，完成阀门、三通及水表等关键节点排查，确认该支线具备气体示踪检测条件。技术团队依据管道长度、口径及运行压力参数，精准核算气体用量后，采用 10 升高压气罐（输出压力 4MPa），经减压阀调节至适配压力，从消防栓接口注入氢氮混合示踪气体；为缩短停水影响时长、提升检测效率，同步在管道末端设置排气口，注气半小时后，末端排气口成功监测到稳定的示踪气体信号^[1]。

技术团队随即采用高精度氢气传感器开展全线路扫描检测，成功定位 3 处漏点；经现场开挖验证，漏点类型包括 2 处微小针孔漏点及 1 处水包管型大漏点。完成漏点修复后，漏失率稳定降至 5%，漏损控制效果达到预期。

4 技术验证成果

如表 2。

表 2（成果量化统计）

成果类型	指标	成果数据
技术成果	技术文件输出	形成《供水管网气体示踪检漏技术分析报告》1 份，《供水管网气体示踪检漏技术操作手册》1 份
检测性能	漏点定位准确率	100%（12 处漏点均精准定位并验证）
检测效率	相对传统听漏法提升幅度	攻坚克难和环境复杂地区提升 60% 以上（时间、人力、物力累计投入）
微小漏点检出能力	最小可检出漏量	0.1 吨/小时（传统方法最小检出限为 1 吨/小时）
人才培养	专业化技术团队规模	12 人，涵盖施工管理、实操检测、数据分析 3 个方向
行业价值	适用管材类型	PE 管、钢管、球墨铸铁管等主流供水管材
行业价值	适用场景覆盖范围	绿化地、硬化路面、沿海盐碱地等复杂地质环境

5 结语

针对传统检漏技术在复杂管网环境中定位精度有限、疑难漏点检出能力不足的行业痛点，本项目重在研究匹配乐清本地的气体示踪检漏技术。该技术以安全环保的氢氮混合气体为示踪介质，依托氢气小分子扩散特性与高精度传感检测技术，突破了传统方法对声音信号的依赖，实现了漏点的精准识别与定位。技术研发过程中，系统解析了沿海盐碱地、城区硬化路面、绿化地等典型地质环境的气体扩散机理，形成了与不同土壤结构、地表覆盖条件相适配的差异化检测方案，彰显了技术在复杂场景下的机理适配性与环境兼容性。通过融合 GIS 管网数据与气体用量精准核算模型，优化了操作流程，在保障检测效果的同时，最大程度降低了对供水服务的影响，体现了技术的实用性与精细化设计思路。

试点应用验证表明，该技术可有效破解微小渗漏、水包管等传统方法难以攻克检测难题，兼容各类主流供水管材，形成了标准化操作规范与专业化技术团队，为管网漏损治理提供了科学、高效的技术支撑。作为供水管网精细化运维的核心技术革新，该技术不仅显著提升了漏损控制的精准度与效率，更构建了可复制、可推广的技术范式，推动供水漏控向更具科学性、系统性的治理模式转型。

参考文献

- [1] 毛嘉荣.试论自来水管网的检漏技术[J].科技创新与应用, 2017(22):40+42.
- [2] 祝晓明.检漏技术在自来水管网中的应用[J].科技经济市场, 2016(08):10-11.
- [3] 叶立军.关于自来水管网的检漏技术的分析[J].科技创新与应用, 2015(20):185.