

热力管网泄漏检测技术探讨

王 佐

中核第七研究设计院有限公司 山西 太原 030000

摘 要：核厂区配套热力管网工况复杂、运维标准严苛，管网泄漏易引发安全隐患与生产停滞问题。为提升管网运行安全性与运维效率，本文系统分析管网腐蚀、施工缺陷、外力扰动等泄漏诱因，梳理泄漏造成的能源损耗、安全风险及生产干扰等多维危害。对比人工巡检、压力流量监测、声学检测等传统技术的应用短板，重点探究分布式光纤、红外热成像、物联网传感三类智能检漏技术的性能优势与适配场景。结合核厂区实际管网开展联合检漏试验，验证了多技术组合检漏方案的实用性，可为核工业热力管网安全运维、漏点精准排查提供工程参考。

关键词：热力管网；泄漏成因及危害；检测技术；核配套管网

引言：核配套热力管网是厂区生产运维、建筑采暖的核心配套设施，相较于民用供热管网，其周边设备密集、受限空间多、运行工况复杂，泄漏隐患管控难度极大。随着厂区管网服役年限逐年增长，管道老化腐蚀、接口密封失效等问题逐步凸显，传统检漏技术效率偏低、误判漏判率高，难以满足核厂区安全生产的严苛管控要求。为解决隐蔽漏点排查难、设备电磁干扰检测等现场难题，本文结合厂区实际运维工况，系统剖析管网泄漏成因，对比各类检漏技术优劣，择优适配智能化检漏方案，为厂区管网长效安全运行提供技术支撑。

1 热力管网泄漏成因与危害分析

1.1 泄漏根源的多维度剖析

热力管网泄漏的产生，是多重因素交织作用的结果。从材质层面看，部分管道长期受介质腐蚀，抗压能力持续衰减，为泄漏埋下隐患；施工环节若焊缝工艺不达标，存在气孔、未焊透等缺陷，在运行压力与温度波动下，极易引发泄漏。运行环境中，土壤酸碱度失衡加速管道腐蚀，外力破坏如施工挖掘、车辆碾压，直接损伤管道结构。管网频繁启停产生的热胀冷缩应力，在应力集中部位不断累积，导致管道开裂。维护管理缺位，未能及时排查隐患、修复老化部件，进一步放大了泄漏风险，这些因素共同构成了泄漏的核心诱因。

1.2 泄漏引发的多维危害

热力管网泄漏带来的危害覆盖多个维度。能源层面，泄漏导致热水大量流失，据测算，中型管网年泄漏量可达数万吨，造成巨大能源浪费，直接推高供热成本，削弱经济效益。供热质量上，泄漏点周边用户室温难以达标，严重影响民生体验。安全层面，泄漏的高温

热水可能烫伤人员、浸泡建筑地基，引发地面塌陷，甚至因泄漏导致管网压力骤降，影响系统稳定运行。环境方面，高温介质蒸发、土壤污染等问题，也会对周边生态造成不良影响，凸显泄漏治理的紧迫性。管网突发泄漏需办理厂区停工、开挖作业审批手续，打乱核厂区工艺运维排班计划，增加专项施工及安全监管工作量，一旦渗漏触碰工艺弱电管线，还会造成仪表失灵、设备停运，带来间接生产经济损失^[1]。

2 传统热力管网泄漏检测技术研究

2.1 人工巡检技术及应用局限

人工巡检是核厂区管网基础兜底检漏手段，依托持证运维人员现场排查，适配日常常态化巡查，适配老旧简易管网隐患排查，现场短板较为明显。（1）检测流程与操作方法。巡检人员持证携带防爆听音棒、接触式测温仪、便携式压力表，沿管网管沟、阀井、管线路由巡查，重点核查焊缝、补偿器、阀组等高危点位。通过听音棒甄别管道异响，测温仪比对地表土体温度，结合管网压力表研判压力波动，标记疑似漏点，同步上报设计院及运维部门联合复核。（2）应用局限与检测盲区。人工巡检作业效率低，厂区管网路由跨施工区、生产区，全线巡检周期长；依托经验判别点位，无数据支撑，厂区电磁、振动干扰下，微小泄漏极易漏判，仅适用于表层、大型显性漏点排查。

2.2 压力与流量监测技术原理及实践

压力流量监测为厂区管网固定式常规监测技术，依托场站仪表联动监测，实现泄漏常态化预警，实用性与局限性并存。（1）核心原理与检测逻辑。在厂区换热站、主干管节点、分区阀门处安装防爆压力、流量传

感器, 稳态工况下管网进出口参数差值恒定; 泄漏发生后下游压力降低、循环流量差值变大, 系统比对后台阈值, 即刻分级预警, 运维人员依托参数波动范围, 划定片区泄漏范围。(2) 应用场景与实践效果。该技术适配厂区主干管网、分区闭环管网全天候值守监测, 无需现场作业, 可实时核算介质泄漏量, 为管网调阀、分区关停提供数据支撑, 厂区多年运维中可有效预警大面积泄漏事故。(3) 技术短板与改进方向。微小渗漏参数波动极小, 易被机组启停、管网调温产生的参数波动覆盖, 无法识别早期隐患; 仅能划定片区范围, 无法精准定点, 必须搭配其他技术完成点位核验。

2.3 声学检测技术的方法与特点

声学检测依托泄漏流体振动发声判别点位, 是核厂区现场定点检漏常用传统技术, 定点效果较好, 但厂区环境干扰制约检测精度。(1) 工作原理与检测方法。高温热水从破损位置外泄, 摩擦管壁、回填土体产生低频声波, 依托电子听漏仪、外壁声发射传感器采集声波信号。现场地面听音适用于浅埋管线, 外壁布设传感器适用于阀井、裸露管段, 通过声波强弱、传播方向, 判定破损精准位置。(2) 技术优势与检测效能。声学检测对毫米级微小渗漏敏感度高, 定点精度优于压力流量监测, 设备便携防爆, 符合厂区动火周边作业要求, 厂区存量管网多次依托该技术找到焊缝微渗漏点位, 降低停供维修成本。(3) 环境干扰与技术瓶颈。厂区风机、工艺机组持续振动, 会同地下杂散信号干扰声波纯度, 深埋管线声波衰减快, 信号失真概率高, 单一声学检测无法独立完成全域检漏^[2]。

3 新型智能热力管网泄漏检测技术

3.1 分布式光纤传感检测技术

分布式光纤传感抗电磁干扰能力强, 可耐受 0-1000MHz 全频段电磁杂波干扰, 适配核厂区弱电密集、核级仪表毗邻的长线管网监测场景, 完全满足核工业 ExialICT6 本安防爆运行资质, 是厂区长效智能检漏的优选技术。(1) 技术原理与系统构成。依托光纤布里渊分布式散射效应, 耦合瑞利高精度测温原理, 全天候 24h 同步采集管线沿线轴向温度、微观应变变形双维度连续数据, 整套系统符合核厂区最高本安防爆等级标准, 核心由防爆激光发射主机、316L 耐腐蚀铠装测温光纤、高精度信号解调仪、厂区专属加密数据终端四部分组成。光纤随管道保温层外侧同步一体化贴合敷设, 管网破损介质外泄后, 管周土体温度会产生 1.5-8℃ 特异性温升、管道局部产生微应变偏移, 系统实时解析散射特征信号, 可精准生成渗漏坐标、渗漏量级、管壁损伤

程度三类核心量化数据。(2) 监测优势与应用效果。定制化铠装外护光纤可耐受 pH 值 2-12 的高盐分、酸碱腐蚀地下土质, 100% 规避厂区配电廊道、核测控仪表电磁杂波干扰, 可实现全域长线无间断监测, 漏点定位精度可达 $\pm 0.5\text{m}$, 可提前 7-15 天捕捉管壁腐蚀、焊缝疲劳微形变隐患, 适配厂区 2-8km 长距离工艺主干管网预埋敷设, 彻底实现事后查漏向预防性检漏转型, 有效降低 90% 以上的突发泄漏停供风险。(3) 技术难点与解决路径。厂区改扩建、土建开挖作业易刮蹭破坏光纤链路, 管线改造后光纤点位无法灵活改迁, 同时机组 10-50Hz 低频振动易产生伪应变信号, 造成误报警, 误报率最高可达 12%。施工阶段采用高强度玻璃钢防腐护套防护敷设, 按管网分区模块化组网、分段独立布设光纤, 后端信号系统加装自适应动态滤波模块, 精准剥离机组运行振动杂波, 将系统误报率降至 1% 以内, 有效适配核厂区复杂联动工况^[3]。

3.2 红外热成像检测技术

红外热成像为核厂区非接触式无损快速筛查检漏技术, 设备完全符合厂区二类防爆作业标准, 作业便捷、无需接触承压管线, 适配厂区全域地表大面积管网普查作业。(1) 核心原理与设备特性。依托高精度防爆红外热像仪采集地表土体、构筑物红外辐射能量, 经由光电转换生成分辨率达 320×240 的可视化等温热力图谱, 核配套热水管网介质恒温稳定在 120℃-130℃, 泄漏后回填土层会在 30-120min 内形成蓄热升温效应, 形成边界清晰、温差 $\geq 1^\circ\text{C}$ 的高亮高温热斑, 依托地表固定温差阈值精准判定疑似漏点, 整机便携防爆、重量 $\leq 3.5\text{kg}$, 可满足生产区阀井周边、动火作业临近区域等高风险场景合规检测作业。(2) 检测优势与应用场景。单人单日可完成 3-5km 管网路由地表扫描, 检测效率较传统人工声学听音提升 6-8 倍, 全程不开挖、不扰动管网正常运行, 适配厂区覆土厚度 0.5-2.0m、无厚重硬化构筑物遮挡的直埋管段, 依托 $0.3^\circ\text{C}/\text{min}$ 的温变速率差值, 可快速区分地下水天然渗水、供热热水渗漏两类温差信号, 高效缩小精准检漏范围。(3) 优化方向与提升路径。厂区绿植覆盖、沥青混凝土地面会衰减 30%-60% 地下热量传导, 毫米级微小渗漏地表温差低于 0.8°C , 常规设备识别准确率不足 40%。实操采用昼夜分时错峰测温, 避开日间 $\pm 3^\circ\text{C}$ 环境热源干扰, 开展 0° 、 45° 、 90° 多角度立体扫描成像, 搭载核厂区管网专属 AI 温差甄别算法, 量化区分原生地温、泄漏温升数值, 将隐蔽微小漏点判别准确率提升至 92% 以上^[4]。

3.3 智能传感器与物联网融合检测技术

物联网传感联动监测搭建闭环式厂区热力云端管控体系，彻底改变传统人工巡检被动查漏模式，实现泄漏隐患分级预判、主动预警。（1）技术架构与传感器部署。搭建符合厂区内网一级保密要求的“防爆传感终端-工业专网-云端运维管控平台”闭环架构，在管网弯头、补偿器、阀门井、廊道接驳口等应力集中高危点位，按每 50m 布设 1 套的密度批量部署本安型温压流一体化防爆传感器，全部数据依托厂区内网闭环传输，全程隔绝外网接入，彻底规避工艺运行数据泄密风险。（2）平台功能与预警能力。平台分区归档各支路管网常年稳态运行参数，存储周期不低于 5 年，通过多级差分算法实时比对实时数据与基准阈值，参数异常后 10s 内完成现场声光、中控室屏幕双向分级预警，可精准溯源泄漏发生时段、参数波动规律，便于设计院复盘管网设计、敷设施工缺陷，辅助运维编制季度、年度计划性检修方案。（3）应用前景与拓展方向。系统可无缝对接厂区现有智慧后勤、工艺运维一体化平台，后期可加装管壁腐蚀速率、轴向应力专项传感模块，完善管网全生命周期健康监测维度；迭代优化厂区工况研判算法，精准剔除工艺调温、水泵启停带来的瞬时参数波动干扰，将早期泄漏预判精度提升至 95% 以上，适配核厂区智慧化、一体化运维升级发展需求。

如图 1 集中展示分布式光纤传感、红外热成像、物联网传感三类技术在核厂区热力管网中的协同应用关系：光纤沿管网实现长线连续监测，红外热成像完成地表快速普查，物联网传感器在关键节点实现闭环预警，三者共同构成“事前预警—事中定位—事后处置”的智能检漏体系。

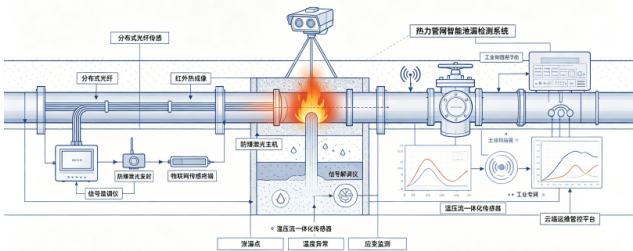


图 1 核配套热力管网智能泄漏检测系统组成示意

4 检漏技术在核配套热力管网工程中的应用

本次选取厂区核辅助供热直埋热水管网为应用对象，管网设计压力 1.6MPa，供水温度 130℃，管线周边分布电气廊道、构筑物基础，检测作业受限条件多，结合场地工况组合选用检漏工艺，实操流程如下：（1）前期工况摸排。提前调取管网竣工图纸，标记补偿器、焊接接口、阀门井等高危泄漏点位，关停支线冗余管路，稳定管网介质压力与流量，规避厂区设备运行振动干扰检测数据，划定专属检测作业区域。（2）分层联合检漏作业。优先采用声学噪声检测仪全域筛查，锁定地下疑似渗漏区段；针对覆土较厚区段，搭配红外热成像设备复核地表温差，剔除地下水渗水、地表温差干扰点位；高危隐蔽管段，采用小型内窥机器人入管检测，精准判定焊缝、管壁破损位置。（3）现场核验与闭环处置。标记漏点坐标后，开挖复核破损形态，区分腐蚀渗漏、接口开裂两类破损类型，同步记录不同工况下各类设备检测误差，完成漏点焊接密封、保温复原作业。（4）作业合规管控。全程遵循核厂区施工规范，检测设备做绝缘防护，避开弱电仪表布设区，施工后开展管网稳压试验，保障修复后管网满足厂区长效供热标准^[5]。

结束语：本文通过分析核厂区热力管网泄漏成因与危害，对比传统与智能检漏技术的应用特性，明确了各类技术的适用场景与技术短板。单一传统检漏技术易受厂区设备振动、电磁信号干扰，难以实现全维度精准检漏，而光纤传感、红外探测、物联网监测的组合工艺适配核厂区复杂工况，可实现管网隐患提前预判、漏点精确定位。

参考文献

[1] 魏凡. 供热管网阀门泄漏声学检测与定位技术研究 [J]. 中国科技期刊数据库工业 A, 2026(3):031-035.

[2] 王占山, 杨亚龙, 张思龙, 朱超然, 胡伯健, 郭宇, 雷越, 齐鹏程. 基于多技术融合的热力管网泄漏检测方法及应用 [J]. 节能, 2025, 44(7):107-111.

[3] 申鹏. 供热管网泄漏检测与预防技术研究 [J]. 科海故事博览, 2024(16):118-120.

[4] 相克政, 李元章. 基于机器学习的供热管道泄漏检测 [J]. 中国新技术新产品, 2025(21):137-139.

[5] 陈晋如. 多径管网泄漏检测算法在热力管网监测中的应用 [J]. 中国高新科技, 2025(13):132-134.