

城镇供水管网漏损控制技术分析

孙卫杰

行唐县自来水管理中心 河北 石家庄 050600

摘要：针对城镇供水管网漏损问题，系统分析了漏损的物理力学机制与技术分类，阐明了管材疲劳、应力腐蚀开裂、接口剪切变形及压力波动爆管等成因。论述了区域计量分区压力管理、减压设施选型、管网拓扑优化等水力调控方法。探讨了声学检测、示踪气体、智能传感及遥感探测等漏损监测定位技术。分析了管材全生命周期性能评估与非开挖修复、开挖更换等管网更新技术。此外，结合水力计算模型、数字模拟及大数据分析等手段，为管网漏损的精准控制与科学管理提供了多维度的技术路径与理论支撑。

关键词：城镇供水管网；漏损控制技术；调测技术；修复技术

引言：城镇供水管网漏损控制是保障水资源高效利用与供水安全的核心技术课题。漏损成因涉及管材疲劳、应力腐蚀、接口失效及压力波动等物理力学机制，类型涵盖背景渗漏、突发爆管及结构性与非结构性漏损。漏损量的精确量化依赖最小夜间流量法与压力-流量模型等水力计算方法。压力管理、减压设施选型与管网拓扑优化构成水力调控核心手段。声学检测、示踪气体、智能传感及遥感技术为漏损定位提供多层次监测方案。管材性能评估、非开挖修复与开挖更换技术则是管网更新主要途径。

1 供水管网漏损机理与分类特征

1.1 管网漏损的物理力学机制

管材在长期运行中受到内部水压和外部荷载的共同作用，材料性能逐渐退化，疲劳效应使管壁微观裂纹不断扩展，最终在应力集中区域发生开裂。腐蚀性环境介质加速管材化学性质的改变，在拉伸应力协同下产生应力腐蚀开裂，这类破坏往往在远低于管材强度极限的条件下突现。接口部位是管网系统的薄弱环节，地基发生不均匀沉降时，管道接口处产生较大的剪切变形与附加应力，密封结构失效导致渗漏通道形成。输配系统中压力波动频繁发生，当瞬时压力超过管道承压极限时，会引起管壁环向应力超限，造成管道的脆性断裂或爆裂，这种爆管效应通常表现为大流量的突发性漏水。

1.2 漏损类型的技术分类

背景漏损是指管道微小缝隙、接头细微间隙等大量分散且难以定位的渗漏，其单点漏量极小但总量可观，而突发爆管表现为管道突然断裂形成的大流量喷射状漏水，两者在漏损规模、发生频率和可检测性上存在显著差异。结构性漏损源于管道本体、接头或附属设施的物理损伤，属于管道实体缺陷导致的漏水，非结构性漏损

则与操作管理环节相关，如阀门未完全关闭、消火栓使用后未关严等自由出流状态^[1]。显性漏损在地表可见渗水或冒水现象，通过巡查可直接发现，暗漏则全部渗入地下，地表无任何可见迹象，但两者均会降低供水效率并改变周围水力环境。

1.3 漏损量的水力计算模型

最小夜间流量法基于用户用水量降至最低的时段测量进入供水区域的总流量，需扣除夜间合法用水量，并对温度变化、压力波动等因素进行系统修正后方可得到相对真实的漏损量。压力与漏损流量之间存在非线性的对应关系，降低运行压力可显著减少漏损流量，这一关系模型能够用于不同压力工况下漏损量的预测与评估。水量平衡分析中将表观漏损界定为因计量误差、水表不准确或数据抄录错误导致的供水与售水之间的差值，真实漏损则是管道渗漏、爆管等物理损失的水量，两者的区分依赖于对各类水量组成要素的精确核算与误差来源的系统识别。

2 供水管网水力调控与减压技术

2.1 压力管理体系

区域计量分区方法将供水管网划分为若干相对独立的子区域，针对不同区域的地形特征、用水性质和管道承压能力制定差异化的压力控制目标，形成分级分区的压力管理策略。每个分区的供水压力根据区域内最高自由水头需求与管道安全限值之间的合理区间进行设定，避免全局统一压力造成局部过高或不足。削峰填谷通过对用水高峰时段的压力补偿和低谷时段的压力削减，使管网压力曲线趋于平缓，大幅降低压力极值出现的频率与幅度。管网压力的剧烈波动是导致管道疲劳损伤积累的关键因素，削峰填谷能够显著减少管道承受的交变应力循环次数，从而延缓管材老化进程并降低突发性爆管

的发生风险。

2.2 减压设施的选型与控制

减压阀通过阀芯的开度调节实现出口压力的稳定控制,其水力特性体现在不同流量条件下保持设定压力的能力,调节精度取决于阀体结构、响应速度及上游压力变化的适应范围。调压塔利用水柱高度产生的静压抵消管网中的压力波动,当系统压力骤升时多余水体进入塔体,压力骤降时塔内水体回流补充,气压罐则依靠可压缩气体吸收压力脉冲,两者共同实现对瞬时压力波动的快速补偿。泵站变频调速技术通过改变水泵电机的供电频率来调节转速,使水泵输出压力与实际需水量相匹配,避免定速泵在低流量工况下产生的过高压力,从而在满足用户用水需求的同时将管网运行压力维持在最优水平。

2.3 管网拓扑结构的水力优化

环状管网通过多条连通路径形成闭合环路,任一管段发生故障或过载时水流可由其他路径绕行供应,水力冗余度高,而枝状管网呈树状发散结构,末端区域仅靠单一路径供水,冗余度低且局部压力受上游阀门状态影响显著。阀门启闭方案的调整会改变管网中水流的路径与分配,部分阀门关闭将导致下游区域压力下降而旁通路径流量增加,合理配置阀门操作顺序与开度组合可实现对局部过高压力的分散疏导^[2]。多水源供水系统中各水源的出水压力与流量分配相互耦合,通过调节各水源泵站的运行参数及管网中间阀门的开闭状态,使不同水源的供水边界稳定过渡,消除因压力差引起的水体往复流动与能量浪费。

3 漏损监测与定位检测技术

3.1 基于信号的声学检测技术

主动检漏技术利用相关仪在管道两端或不同点位同步采集漏水产生的振动信号,通过分析信号到达各传感器的时间差异来计算漏点位置,该技术适用于金属管材等声波传导性能良好的管道系统,对非金属管材的适用性则受声波衰减特性影响。被动听音法依靠检漏人员或地面听音设备直接听取管道上方地面的漏水声,该方法易受交通、施工等外界噪声干扰,采用滤波装置或选择夜间安静时段作业可有效抑制环境噪声对听音精度的不利影响。管道预定位技术在被测管段内施加特定声学激励信号,通过分析回波特征预先判断漏点所在的大致区段,从而缩小详细定位的搜索范围,提高后续精确定位作业的针对性与效率。

3.2 基于流体特性的检测技术

示踪气体检测方法向管道内部注入特定气体,气体在

压力作用下从漏点逸出并穿透覆盖土层到达地表,操作流程包括管道隔离排水、气体注入与稳压、地表气体浓度扫描以及漏点位置的最终确认。区域检漏法通过封闭待测区域的进出水阀门并测量该区域的最小夜间流量来判断是否存在漏损,而一步检漏法则直接对单段管道进行流量与压力的关联测试,两者在检测范围、作业时间和漏损定位精度上存在明确的技术差异。管道闭水试验在被测管段两端设置封堵并充满水后维持静水压力,通过观察规定时间内的压力下降幅度判定管道是否满足保压要求,压力降超过允许范围则表明存在结构性渗漏。

3.3 智能传感与在线监测技术

远传水表与流量计持续采集供水管网中的瞬时流量和累积流量数据,通过对比同一计量区域内进水流量与出水流量的差异量,结合历史流量变化规律识别超出正常波动范围的异常数据,为漏损报警提供判断依据。分布式光纤传感技术沿管道敷设光缆,利用光纤对形变的敏感特性实时监测管壁的应变分布变化,当管段发生开裂或沉降时,应变异常点的位置可被快速确定。在线监控系统集成压力传感器、流量计与水质分析仪,将采集到的各类运行参数通过通信网络实时上传至监测平台,实现对管网水力状态、水质指标和运行安全性的连续跟踪与远程预警^[3]。

3.4 卫星与遥感探漏技术

合成孔径雷达干涉测量技术通过对同一区域多次过境获取的雷达影像进行相位差分处理,可以检测出地表微小的垂直形变量,长期供水渗漏造成的地下土体流失会引起地面缓慢沉降,沉降区域的形变速率可间接反映地下管网的渗漏状况。高光谱遥感技术利用成像光谱仪记录地表物体对不同波段电磁波的反射与吸收特征,长期渗漏使土壤含水量升高会改变土壤的光谱曲线形态,通过分析反射率在特定波段的异常变化能够识别水分富集区域,从而圈定可能存在暗漏的地表范围。

4 管网更新修复与非开挖修复技术

4.1 管材全生命周期性能评估

球墨铸铁管在服役初期内壁水泥涂层保持光滑,随着运行时间延长,水流冲刷与电化学腐蚀逐渐破坏涂层完整性,铁锈瘤和沉积物附着使水力粗糙度持续上升。塑料管内壁初始光滑且抗腐蚀能力强,但在长期使用中受水中砂粒磨蚀及紫外线老化影响,表面微观结构发生变化,水力粗糙度在生命周期后期也会出现缓慢增长,但其增幅远小于球墨铸铁管。管道内壁涂敷防腐层可有效隔离金属基体与腐蚀介质,但当涂层因施工缺陷或长期水力冲刷出现破损后,暴露的金属区域会加速局部腐

蚀。结垢过程包括碳酸钙等硬度成分沉淀及铁细菌代谢产物聚集,沉积层不断增厚使过流断面面积减小,同时粗糙表面大幅增加水流阻力,导致同等压力下的输水能力显著下降^[4]。管道剩余强度的无损评估技术利用电磁检测识别管壁腐蚀坑的位置与深度,借助超声波测厚获取壁厚分布数据,通过声发射技术捕捉材料受力时的微破裂信号,在不破坏管道的前提下综合判定剩余承压能力,为管网修复或更换决策提供依据。

4.2 非开挖修复技术

原位固化法将浸渍树脂的内衬材料贴附于待修管道内壁,固化工艺通过循环热水使树脂发生热聚合反应,或通入蒸汽利用高温加速交联过程,也可采用紫外线灯组行进触发光引发剂完成固化,固化过程中温度与压力的精确控制决定了内衬层的厚度均匀性和最终力学性能。短管内衬法将直径略小于原管道的塑料管拉入旧管内部,然后向内衬管与原管的环状空隙注入填充材料,硬化后使新旧管体结合为共同受力的复合结构。碎管法则使用膨胀式碎管头从内部将旧管沿纵向撑裂并将碎片压入周围土层,同时紧随其后拉入新管完成替换,新管外径可达到或超过旧管原有外径。螺旋缠绕法通过缠绕设备在原管道内将预制型材连续卷制成螺旋管,型材边缘通过自锁机构和密封材料实现机械锁紧与防水封闭,当螺旋管与旧管的环隙注浆填充后,外部土压力和水压力通过旧管传递至螺旋管,结构整体性得到保障。

4.3 开挖更换技术与施工质量控制

新旧管网连接处采用柔性接头来适应差异沉降和温度变形,接头内部设置橡胶密封圈维持持久的密封压力,配合机械锁定装置防止接头在内外压力波动下发生脱开,同时允许管道产生小幅度位移而不破坏水密性能。管道基础处理首先对沟槽底部原状土进行承载力复核,对软土或不均匀地基需挖除软弱层并换填级配良好的砂石材料,基础垫层的厚度与压实度必须满足设计要求,确保管道安装后不会因基础不均匀沉降而产生局部

悬空或过大弯曲应力。回填作业按照管底、管侧和管顶三个区域分别执行不同的压实标准,管底区域采用细颗粒材料人工夯实,管侧区域分层回填并使用小型压实机具逐层压密,管顶以上区域在达到一定覆盖厚度后方可使用重型压实设备^[5]。修复后管网的水压试验将管段内水压逐步升至设计压力的若干倍并维持规定稳压时间,期间压力下降值不得超过允许上限。冲洗消毒作业先向管段内注入高浓度消毒液浸泡足够时长以灭活附着的微生物,随后使用清洁水连续冲洗直至出水中的消毒剂残余浓度和微生物指标均符合安全标准,方可与既有供水管网系统连通。

结束语:城镇供水管网漏损控制涉及多技术领域的协同配合。通过解析漏损物理力学机制与分类特征,结合最小夜间流量法等水力模型实现漏损量精确量化。压力管理、减压设施选型与管网拓扑优化有效降低运行压力对管网的损伤。声学检测、示踪气体、智能传感及遥感技术构成多层次监测定位体系。非开挖与开挖修复技术保障管网结构安全。各技术环节的系统集成与优化组合,是实现管网漏损精准防控、延长管网服役寿命、提升供水系统运行效率的关键路径。

参考文献

- [1]杨丹.城镇供水管网漏损现状分析及漏损控制技术研究进展[J].环境保护前沿,2022,12(2):9.
- [2]郭勇.城镇供水管网漏损原因及控制措施探讨[J].城市周刊,2022(1):87-88.
- [3]艾明英.漏损控制系统在供水管网漏损控制工作中的应用[J].2023(4):127-129.
- [4]王红霞,刘志强,李明辉.基于多源数据融合的城市供水管网漏损定位方法研究[J].给水排水,2022,48(05):123-124.
- [5]陈建国,周晓峰,赵婉婷.城市供水管网漏损控制技术体系构建与实践[J].中国给水排水,2021,37(14):48-50.