

# 大管径球墨铸铁管道水压试验漏水点精准定位技术

陈磊

新疆准东经济技术开发区工程建设项目管理中心

DOI:10.12238/hwr.v9i7.6464

**[摘要]** 大管径球墨铸铁管因其优异的力学性能、良好的密封性及施工便捷性,在大型输水工程、城市给排水管网建设中应用日益广泛。水压试验作为管道工程竣工验收的核心环节,其合格与否直接关系到管网系统的长期安全稳定运行。针对试验中出现的渗漏问题,能否实现漏水点的精准定位,是决定修复效率、降低工程风险与经济成本的关键。本文系统梳理了当前适用于大管径球墨铸铁管道水压试验阶段的漏水点定位主流技术,包括声波检测法、红外热成像法以及气体示踪法。研究表明,综合应用多种技术手段并注重操作规范性,可显著提升漏水点定位的精度与效率,为保障管道工程质量与服役安全提供强有力的技术支撑。

**[关键词]** 水利工程; 大管径球墨铸铁管; 水压试验; 漏水检测; 精准定位

**中图分类号:** TV 文献标识码: A

## Precise Location Technology for Leak Points in Hydraulic Pressure Tests of Large-Diameter Ductile Iron Pipes

Lei Chen

Engineering Construction Project Management Center, Xinjiang Zhundong Economic and Technological Development Zone

**[Abstract]** Large-diameter ductile iron pipes are increasingly widely used in large-scale water conveyance projects and urban water supply and drainage pipeline network construction due to their excellent mechanical properties, good sealing performance, and convenient construction. As a core part of the completion acceptance of pipeline engineering, the hydraulic pressure test directly determines the long-term safe and stable operation of the pipeline network system. Regarding the leakage issues that occur during the test, the ability to achieve precise location of leak points is crucial for determining repair efficiency and reducing engineering risks and economic costs. This paper systematically reviews the mainstream technologies currently applicable for locating leak points during the hydraulic pressure test stage of large-diameter ductile iron pipes, including acoustic detection method, infrared thermal imaging method, and gas tracing method. Research indicates that the comprehensive application of multiple technical means, along with an emphasis on operational standardization, can significantly enhance the accuracy and efficiency of leak point location, providing strong technical support for ensuring the quality and service safety of pipeline engineering.

**[Key words]** Water conservancy engineering; Large-diameter ductile iron pipe; Hydraulic pressure test; Leak detection; Precise location

### 引言

在长距离输水干线、大型泵站出水管、城市供水主干环网等关键系统中,大管径球墨铸铁管道凭借其高强度、高韧性、优良的抗腐蚀性能、较长的使用寿命以及可靠的接口形式,已成为管道工程建设的优选材料之一。水压试验是管道工程安装完成后,依据国家及行业相关规范(如《给水排水管道工程施工及验收规范》GB 50268)必须进行的强制性检验程序,其目的在于验

证管道系统的整体强度、严密性以及接口的施工质量。试验压力通常设定为管道设计工作压力的1.5倍,在持续稳压时间内,压力降超过允许值或观察到明显的渗漏现象,即判定为不合格。一旦水压试验失败,快速、准确地确定漏水点的具体位置成为后续修复工作的首要前提。尤其对于埋设于地下、穿越复杂地形或结构物的大管径球墨铸铁管,漏水点的隐蔽性使得传统的人工巡检方式效率低下、定位精度差,往往需要大面积开挖排查,

造成巨大的人力、物力浪费和工期延误,甚至可能引发次生灾害或环境影响。因此,发展并应用高效、可靠的漏水点精准定位技术,对缩短工程周期、控制项目成本、保障管网系统投运后的安全性与可靠性具有极其重要的工程价值和现实意义。本文旨在聚焦水压试验这一特定场景,深入探讨适用于大管径球墨铸铁管道的漏水点精准定位技术体系,分析其原理、方法、适用性及发展趋势。

## 1 大管径球墨铸铁管道水压试验漏水特性

### 1.1 漏水特性

深入理解泄漏现象的本质是精准定位的前提。在水压试验工况下,大管径球墨铸铁管道的泄漏主要源于以下方面:(1)接口密封失效。橡胶密封圈安装不正、扭曲、老化或损坏;承插口清理不净存在杂质;推入不到位或角度偏差;法兰连接螺栓紧固力不均或垫片缺陷。(2)管体损伤。运输吊装过程中的意外碰撞产生的裂纹或孔洞;管材本身存在的铸造缺陷(如砂眼、疏松)在高压下暴露。(3)附属设施连接处渗漏。阀门阀体或阀盖密封不良;排气阀、泄水阀、伸缩节等管件连接处密封不严;与钢管、混凝土管等异种材质管道转换接口处理不当。

### 1.2 定位难点

大管径球墨铸铁管道在进行水压试验时,漏水点的定位面临一系列显著挑战:(1)泄漏形态多样性与隐蔽性。泄漏可能表现为喷射状(管体孔洞)、线状渗出(裂纹)、或缓慢的滴渗(接口密封不严)。尤其对于承插接口的微小渗漏,或发生在管道底部、侧面的泄漏,水流可能沿管壁、管周土壤或外包混凝土层(若有)扩散、下渗,难以在地表形成明显湿润区或冒水点。(2)环境噪声干扰严重。试验现场通常存在施工机械运转、人员活动、风吹草动、附近交通等多种背景噪声。对于依赖捕捉漏水声音的声学检测方法,这些噪声极大地掩盖了微弱的漏水声信号。(3)管道埋深与覆土影响。大管径管道通常埋设较深,覆土层对漏水产生的声音信号、温度场变化或示踪气体的扩散产生显著的衰减、吸收和弥散效应,降低了地表可检测信号的信噪比和强度。(4)大管径效应。管径越大,管壁面积越大,潜在的漏点位置分布范围更广;管道内部水流空间大,漏水产生的湍流和声音在管内的传播路径复杂,声波反射、折射现象明显;管壁自身的振动模式也更复杂。(5)管道材质特性。球墨铸铁材料具有较好的声波传导能力,但其密度和弹性模量不同于钢管或塑料管,对声波的传播速度和衰减特性有特定影响。同时,其热传导性能也会影响红外检测的效果。(6)试验压力与水流状态:高压水流喷出时产生强烈的宽频噪声,本身就可能淹没微弱的泄漏特征声信号。管内水流状态(流速、紊流度)也会影响声波在管内的传播。

## 2 漏水点精准定位核心技术方法及其应用

### 2.1 基于声学/振动原理的检测法

#### 2.1.1 物理基础

基于声学/振动原理的检测法是应用最广泛、技术最成熟的定位方法,其核心在于捕捉漏水产生的独特声波/振动信号。其物理基础为高压水从管道破损处喷射而出时,会与管壁、土壤摩

擦、冲击,产生宽频的振动(结构声)和声波(空气声)。这些声波/振动信号沿着管壁、管内水体以及管周介质(土壤、空气)向远处传播。不同传播路径的信号具有不同的频率特性和衰减特性。

#### 2.1.2 主要技术与设备

(1)听音杆(听漏棒)。最基础的工具。金属杆一端接触管道暴露点(阀门、消防栓等)或直接插入土壤接近管体,另一端通过听筒或耳机供人耳听取。操作者依赖经验辨别混杂在背景噪声中的漏水特征音(通常为“嘶嘶”或“嗡嗡”声)。优点是简单、成本低;缺点是完全依赖人耳和经验,定位精度有限(几米到十几米),效率低,易受干扰,对大埋深管道效果差。(2)电子听漏仪(地面麦克风)。高灵敏度传感器(加速度计或麦克风)拾取地面或管道附属设施上的振动/声音信号,经电子放大、滤波(重点突出漏水特征频段,如100Hz-2000Hz)后输出给耳机或显示屏。通过多点比较信号强弱,确定漏水点大致区域。相比听音杆,抗干扰能力有所提升,但仍易受地表环境噪声影响。(3)相关仪检测法。当前最为精准高效的声学定位技术。其原理基于泄漏声波沿管道向两侧传播的速度恒定。在怀疑漏水的管段两侧(A、B点),通过接触点(如阀门)放置高精度振动传感器。相关仪记录两传感器接收到的漏水信号的时间差( $\Delta t$ )。已知声波在管壁中的传播速度( $V_c$ ,可通过测量或查表获得,球墨铸铁管通常在1100-1500 m/s范围),利用公式 $L=(D-V_c*\Delta t)/2$ (L为漏点到A点的距离,D为A、B两点间距)即可精确计算出漏水点的位置。相关仪能有效抑制与漏水无关的随机噪声,定位精度可达±1米以内,尤其适用于长直管段、埋深较大、背景噪声复杂的场合。其有效性依赖于良好的传感器耦合、准确的传播速度输入以及足够强的泄漏信号。

#### 2.1.3 应用要点

传感器必须良好耦合于金属管件(阀门、消防栓)或通过专用接触杆直接耦合管壁(需开挖小坑);准确测定或选用适用于球墨铸铁管的声波传播速度 $V_c$ 至关重要。现场可通过敲击法(在已知距离两点敲击,测量时间差计算 $V_c$ )进行校准;对于承插接口的微小渗漏,其产生的声信号可能非常微弱,需要高灵敏度传感器和精心选择测点位置;注意排除管道内水流湍流噪声、阀门节流噪声等干扰源。

### 2.2 红外热成像检测法

#### 2.2.1 物理基础

红外热成像技术的物理基础在于泄漏水体与周围土壤间的温度差异所引发的热场畸变。当大管径球墨铸铁管道在水压试验中发生渗漏时,渗入土壤的水流因其热容与导热率差异(水温常低于地温),导致管周局部温度场分布异常。红外热像仪通过捕捉地表辐射的红外能量,生成可视化的温度分布图。实际应用中,需在疑似渗漏区上方进行系统性扫描,识别异常热斑或冷斑的形态特征(如条带状扩散、团块状分布及平缓温度梯度),并结合埋深、土壤类型(黏土保热性优于砂砾)、含水量及气象条件(避免日照/大风干扰)综合判读,以推断渗漏范围与强度。

#### 2.2.2 核心优势

该技术在大管径球墨铸铁管道检测中凸显三重独特价值: (1) 非接触高效筛查。无需开挖或接触管道, 可快速完成长距离管段地表扫描(速度达每小时数公里), 大幅提升普查效率; (2) 隐性渗漏敏感探测。对承插接口慢渗等无地表湿润痕迹的微小泄漏具有识别能力, 通过热异常可视化实现早期预警; (3) 操作安全直观。热像图直接呈现温度场空间分布, 辅助快速锁定可疑区域, 且检测过程无侵入性, 避免施工干扰风险。

### 2.2.3 技术局限性与工程应对策略

面对大管径球墨铸铁管的特殊工况, 该技术存在显著局限, 需针对性优化: (1) 深度与信号衰减。埋深 $>1.5$ 米时地表热异常呈指数衰减。对策: 限定检测于浅埋段( $\leq 1.2$ 米), 或采用主动温差激发技术(如注入温控水体); (2) 环境强干扰。日照、大风、降雨及植被覆盖易掩盖信号。对策: 严格选择夜间/清晨/阴天时段检测, 并清理地表杂物; (3) 温差与时效约束。自然温差常不足 $2^{\circ}\text{C}$ 且热场形成需时较长。对策: 预加热试验用水扩大温差, 延长稳压观察期; (4) 定位模糊与材质干扰。热异常区范围达数米至十余米, 且球墨铸铁高导热性( $36\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )加速热均衡。对策: 联合声学相关仪精确定点, 并采用高分辨率热像仪(像间距 $\leq 1\text{mrad}$ )聚焦接口区域捕捉细微梯度。

### 2.3 气体示踪检测法

#### 2.3.1 物理基础

向待测管道内注入一定浓度的特定示踪气体(常用氦气、氢气、六氟化硫 $\text{SF}_6$ 等), 利用这些气体分子小、扩散速度快、化学惰性、易于检测的特性。当管道存在泄漏点时, 示踪气体会随泄漏水流一同逸出, 穿过土壤孔隙扩散至地表。在地表使用高灵敏度的气体检测仪(如质谱仪、卤素检漏仪、专用氦气/氢气检漏仪)探测示踪气体的浓度, 通过追踪浓度峰值即可确定泄漏点位置。

#### 2.3.2 技术实施步骤

(1) 管道封堵与气体注入。将待测管段两端封堵, 排空部分水体(留出气体空间)或直接注入气体加压(需确保管道结构安全)。向该封闭空间内注入一定浓度的示踪气体, 并保持一段时间(数小时), 使气体充分扩散至泄漏点。(2) 地表探测。在管道上方沿管线走向, 使用探头在地表(或打小孔插入浅层土壤)进行网格化、高密度采样, 实时检测示踪气体浓度。(3) 定位。记录各测点的浓度值, 绘制浓度分布图。浓度最高的区域通常对应着泄漏点正上方。对于大范围检测, 可结合GPS进行精确定位绘图。

#### 2.3.3 应用特点

其核心优势在于对环境噪声干扰极不敏感, 可有效规避施工机械等背景噪声影响; 对微小慢速渗漏(如承插接口滴渗)具有卓越检出能力, 能捕捉常规方法难以识别的隐性泄漏; 理论定位精度达 $\pm 0.5$ 米, 且不受管道埋深限制, 只要气体可扩散至地表即可检测。然而, 该技术面临显著工程局限: 高纯度示踪气体(氦气、 $\text{SF}_6$ )及高精度检测设备(如质谱仪)成本昂贵; 操作需封

堵管道、分段注气并等待数小时扩散平衡, 大幅延长试验周期; 土壤密实度、含水量及分层结构会扰动气体扩散路径, 导致浓度峰值偏移或弥散——粘性土或饱和土层中气体迁移受阻, 定位效能锐减; 氢气存在燃爆隐患,  $\text{SF}_6$ 作为强温室气体(GWP值达23,500)需严格密封回收; 操作须遵循防爆规程与环保指南。

## 3 技术发展趋势与展望

### 3.1 光纤传感技术的深入应用

(1) 分布式声学传感(DAS)/分布式温度传感(DTS)。将传感光纤沿管道敷设(外绑或内置), 可连续、实时监测整条管道沿线的振动或温度场。任何位置发生泄漏, 其产生的异常振动或温度变化都会被光纤捕获, 并通过解调系统精确定位(精度可达米级)。尤其适用于长距离、重要管线或难以进入区域的在线监测, 在水压试验后长期运行监测中潜力巨大。目前成本仍较高, 安装工艺要求高。(2) 光纤微振动传感器阵列。在关键管段或高风险点布设高灵敏度光纤振动传感器网络, 实现局部区域的高精度实时泄漏监测与定位。

### 3.2 人工智能与大数据分析

利用机器学习(深度学习)算法, 对海量的声波、振动、温度、气体浓度等检测数据进行智能分析。训练模型自动识别复杂的泄漏信号特征, 有效滤除各种环境噪声干扰, 大幅提升信号识别能力和定位精度。建立基于历史案例和管道信息(材质、压力、埋深、土壤等)的专家数据库, 辅助定位策略优化和结果研判。

### 3.3 高精度定位与可视化集成

结合高精度GPS、北斗定位系统、GIS地理信息系统, 将检测数据(信号强度、温度、气体浓度)和定位结果实时、精确地映射到数字地图或BIM模型中, 实现检测过程的可视化记录和结果的直观展示, 便于指挥决策和修复施工。

## 4 结束语

面对水利工程建设规模日益扩大、管网系统日益复杂的趋势, 持续推动漏水点精准定位技术的创新与应用, 不断提高其智能化、精准化、集成化水平, 对于保障国家水网安全、提升水资源利用效率、服务经济社会高质量发展具有不可替代的重要战略意义。工程技术人员应积极学习掌握新技术、新方法, 并在实践中不断总结经验, 推动该领域技术的持续完善和工程应用水平的不断提升。

## 【参考文献】

- [1] 龚展宏. 鸡鸣水库供水管线打压试验分析[J]. 价值工程, 2022, 41(16): 77-79.
- [2] 刘臻煌. 引水工程管道水压试验具体技术分析[J]. 模型世界, 2022, (16).
- [3] 张保元. 小直径排水管道闭水试验新型堵头研制[J]. 市政技术, 2022, 40(02): 121-124.

## 作者简介:

陈磊(1991—), 男, 汉族, 河南商丘人, 研究生, 中级职称, 研究方向为水利工程建设管理。