

# 基于无损检测技术的引水管线钢管内部缺陷检测与评估

张宇伟 罗玉宝

陕西秦海检测科技有限公司 陕西 咸阳 712000

**摘要:** 引水管线钢管是水資源输送核心载体,其内部缺陷威胁供水安全与工程寿命。传统检测方法效率低且破坏性强,而无损检测技术因非破坏性、精准度高成为主流。本文系统分析了超声、渗透检测等技术的原理,构建“数据采集-特征提取-风险评估”完整体系,并结合工程实践验证效果,研究确定了不同缺陷的最优检测方案,为钢管缺陷的早期识别、精准评估及修复提供依据,对保障引水管线安全运行有重要价值。

**关键词:** 无损检测技术;引水管线钢管;内部缺陷检测;缺陷评估

引言:水資源作为社会发展的关键要素,引水管线钢管是其输送的核心载体,其内部缺陷直接影响供水安全与工程寿命。传统检测方法存在效率低、破坏性强等局限,难以满足实际需求。而无损检测技术凭借非破坏性、精准度高、高效性等优势,成为保障引水管线安全运行的关键手段。本文聚焦引水管线钢管内部缺陷,深入探讨无损检测技术及评估体系,为工程实践提供有力支撑。

## 1 引水管线钢管无损检测技术基础

### 1.1 引水管线钢管常见内部缺陷类型

引水管线钢管在制造、安装及运行过程中易产生多种内部缺陷,主要分为四类。一是裂纹缺陷,多因焊接工艺不当或长期应力作用产生,表现为线性开裂,常见于焊缝及热影响区,若扩展会导致钢管泄漏。二是腐蚀缺陷,包括均匀腐蚀与局部点蚀,前者由水质化学作用引发,后者因钢管内壁保护层破损形成,会降低钢管壁厚与承载能力。三是夹层缺陷,属于制造过程缺陷,由钢材轧制时杂质未完全融合导致,呈层状分布,影响钢管整体性。四是未焊透缺陷,焊接时接头根部未完全熔合形成空隙,降低焊缝强度,在水压作用下易引发失效。这些缺陷隐蔽性强,需通过专业检测技术精准识别。

### 1.2 无损检测技术的核心特性与应用原则

引水管线钢管检测用无损检测技术具有三大核心特性。非破坏性是首要特征,检测过程不损伤钢管结构与性能,可实现管线在役状态下的多次检测。精准性体现在能定量获取缺陷的位置、尺寸、形态等参数,为评估提供可靠数据。高效性则表现为检测速度快、范围广,适用于长距离引水管线的批量检测。应用需遵循三项原则:针对性原则,根据缺陷类型与钢管工况选择适配技术,如焊缝裂纹优先用超声检测;系统性原则,结合多种技术形成互补,避免单一方法的检测盲区;经济性原

则,在保证检测精度的前提下,优化检测方案控制成本,实现安全与效益平衡<sup>[1]</sup>。

### 1.3 无损检测技术的发展现状与趋势

当前引水管线钢管无损检测技术已形成多方法协同格局,超声检测、电磁感应检测等成熟技术被广泛应用,检测设备向便携化、智能化升级,如手持超声检测仪可现场实时传数据。新兴技术里,相控阵超声检测提升缺陷成像质量,导波检测可快速筛查长距离管线,提高检测效率。其发展趋势有三大方向:智能化,结合人工智能算法自动识别分类缺陷;一体化,集成数据采集、分析、存储功能;远程化,借助无线传输与远程控制,实现复杂工况下无人化检测,保障人员安全。

## 2 引水管线钢管内部缺陷的无损检测方法

### 2.1 超声检测技术的应用与操作要点

超声检测技术凭借其对裂纹、未焊透等体积型缺陷的高灵敏度,已成为引水管线钢管内部缺陷检测的核心方法。其基本原理是通过探头发射高频超声波,当超声波在钢管内部传播时,若遇到内部缺陷(如裂纹、夹渣、未熔合等),会发生反射、折射或透射现象。接收探头通过捕捉反射回波信号,结合信号传播时间与幅度变化,可精准定位缺陷位置并定量分析其尺寸。操作前需对钢管表面进行严格预处理,采用砂纸打磨或喷砂工艺去除锈蚀、氧化皮及油污,确保探头与钢管表面耦合良好,避免因接触不良导致信号衰减。检测时,需将耦合剂(如水基凝胶或机油)均匀涂抹于探头与钢管接触面,按预设路径匀速移动探头,同时控制探头与钢管的倾斜角度(通常为 $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ),确保超声波垂直入射缺陷区域,减少信号干扰。针对不同壁厚的钢管,需动态调整超声波频率:厚壁钢管(壁厚 $> 20\text{mm}$ )选用低频探头( $1\sim 2.5\text{MHz}$ )以增强穿透力,薄壁钢管(壁厚 $< 10\text{mm}$ )则采用高频探头( $5\sim 10\text{MHz}$ )提升分辨率,从而

保障检测结果的精准性与可靠性。

## 2.2 电磁感应检测技术的优势与实施流程

电磁感应检测技术（涡流检测）因其非接触式检测特性，广泛应用于引水管线钢管腐蚀、壁厚减薄等缺陷的快速筛查，尤其适用于在役管线的长期监测。该技术的核心优势在于无需直接接触钢管表面，可穿透防腐涂层（如环氧树脂、聚乙烯）直接检测基材缺陷，且不受钢管表面粗糙度、油污或氧化层影响，检测效率较传统方法提升30%以上。其实施流程分为三步：首先进行设备校准，采用标准试块（含人工缺陷）调整检测参数（如激励频率、增益值），确保设备灵敏度与信噪比达标；其次开展现场检测，将检测线圈沿钢管轴向匀速移动（速度通常控制在0.5~2m/s），线圈产生的交变磁场在钢管内感应出涡流，缺陷区域因导电率变化会导致涡流分布异常，设备通过实时采集阻抗变化信号识别缺陷；最后进行数据处理，采用小波变换或傅里叶分析对原始信号进行滤波降噪，剔除环境干扰（如温度波动、电磁噪声），精准提取缺陷特征参数（如深度、长度），生成可视化检测报告。该技术对浅表层缺陷（深度 < 3mm）检测灵敏度极高，但深层缺陷需结合其他方法辅助验证<sup>[2]</sup>。

## 2.3 渗透检测技术的适用场景与检测标准

渗透检测技术（PT）作为一种表面开口缺陷检测方法，主要用于引水管线钢管焊缝、法兰连接面及热影响区的裂纹、气孔、冷隔等缺陷检测，尤其适用于非磁性材料（如不锈钢、钛合金）的缺陷筛查。其技术原理基于毛细作用：液态渗透剂在表面张力作用下渗入开口缺陷，经显像剂吸附后形成可见痕迹，从而实现缺陷可视化。操作需严格遵循一般原则（GB/T 18851.1）等标准：首先对检测表面进行预处理，采用机械打磨或化学清洗去除氧化皮、毛刺及油污，确保表面粗糙度  $Ra \leq 6.3\mu m$ ；随后施加渗透剂（水洗型或溶剂去除型），静置10~30分钟（依温度调整）以保证充分渗透；接着用清洁布或水冲洗去除多余渗透剂，避免过度清洗导致缺陷内渗透剂流失；再均匀喷洒显像剂（干粉或悬浮液），形成厚度0.05~0.1mm的显像层；最后根据缺陷显示痕迹的形状、长度及密集程度，按标准（如ISO 3059）评定缺陷等级（1级~4级），并记录关键参数（如裂纹长度、气孔直径）。该技术成本低、操作简便，但仅适用于表面开口缺陷，对埋藏缺陷无效，需与其他方法（如超声、射线）联合使用以提高检测全面性。

## 3 引水管线钢管内部缺陷的评估体系构建

### 3.1 缺陷评估的核心指标与量化标准

缺陷评估需建立科学的核心指标体系，涵盖缺陷几

何参数、力学影响及运行工况三大类指标。几何参数包括缺陷长度、宽度、深度及面积，是评估的基础数据，采用超声检测与电磁感应检测的联合数据确保精度。力学影响指标包括缺陷处应力集中系数、剩余强度，通过有限元分析计算得出。运行工况指标涵盖管内压力、介质腐蚀性、运行温度，反映缺陷发展的外部环境。量化标准参考《压力管道安全技术监察规程》，将缺陷深度与钢管壁厚的比值划分为四个等级，比值  $\leq 10\%$  为一级（安全），10%-30%为二级（需监测），30%-50%为三级（需修复）， $> 50\%$  为四级（需更换），为评估提供明确依据。

### 3.2 缺陷风险等级的划分与评估方法

结合核心指标将引水管线钢管缺陷风险划分为低、中、高、极高四个等级。低风险对应一级缺陷，缺陷稳定无扩展趋势，不影响钢管正常运行，评估周期为3年。中风险对应二级缺陷，缺陷缓慢扩展，需每1年开展一次跟踪检测，监测缺陷发展速度。高风险对应三级缺陷，缺陷已影响钢管承载能力，需立即制定修复方案，修复前缩短检测周期至3个月。极高风险对应四级缺陷，缺陷严重威胁管线安全，需停止该段管线运行并紧急更换。评估方法采用层次分析法，确定各指标权重，通过综合评分计算风险值，实现风险等级的客观划分，避免主观判断误差<sup>[1]</sup>。

### 3.3 评估结果的应用与缺陷处理建议

评估结果直接指导引水管线钢管的运维决策，形成“评估-处理-验证”的闭环管理。低风险缺陷无需立即处理，纳入常规运维档案定期复查；中风险缺陷需加强监测，在缺陷处安装应力传感器实时监测应力变化；高风险缺陷采用针对性修复措施，裂纹缺陷采用补焊处理，腐蚀缺陷采用内衬修复或局部换管，修复后需重新进行无损检测验证修复效果；极高风险缺陷必须紧急更换，更换后的钢管需进行全面检测合格后方可投入使用。同时，根据评估结果优化管线运维方案，对缺陷集中区域加强日常巡检，调整水质处理工艺降低腐蚀风险，从源头控制缺陷产生。

## 4 无损检测与评估的工程应用实践

### 4.1 工程概况

新疆某水利管线连通工程（KD共线段）及配套工程从一期主体工程已建的KT事故备用及调节水库取水，首先通过一级泵站加压输水至西区地表水厂泵站前池向管道供水，然后通过二级泵站加压输水至DSZ分水口稳压水池，管线总长约10.073km。工程主要由输水管道、沿线建筑物和泵站组成，工程设计年供水量为2.1亿 $m^3$ ，管道

最大设计流量为 $8.0\text{m}^3/\text{s}$ ，工程规模为中型，工程等别为Ⅲ等。

#### 4.2 技术要求

1) 焊前清理:所有拟焊面及坡口两侧各 10~20m 范围内的氧化皮、铁锈、油污及其它杂物应清除干净，每一焊道焊完后也应及时清理。

2) 装配校正:装配中的错边应采用卡具校正，不得用锤击或其它有损钢板的器具校正。预热:按工艺要求需要预热的焊件，应按SL 432-2024的规定进行。焊接:除应遵守SL432-2024第8.2节和SL36-2016第6章的规定外，压力钢管的焊接工艺还应满足:为尽量减少变形和收缩应力，应在施焊前选定定位焊焊点和焊接顺序，从构件受周围约束较大的部位开始焊接，向约束较小的部位推进;对需预热后焊接的钢板，应在清根前预热;每条焊缝应一次连续焊完，当因故中断焊接时，应采取防裂措施。

#### 4.3 检测方法

管道焊缝检测分为:管道焊缝表面缺陷用磁粉渗透检测法(MT)，仪器用磁粉探伤仪;内部缺陷用UT和TOFD检测方法，仪器用超声探伤仪和超声波TOFD检测仪。

#### 4.4 检测与评估过程及结果分析

2025年10月至12月，检测团队按技术要求对3个区段开展检测工作，采用“白天检测采集、夜间数据处理”的模式，共完成10.073km的管线检测，其中:

1) 焊缝表面缺陷(MT)检测413组，抽检比例10%，焊缝类别:一类焊缝、焊缝类型:环缝，检测等级B级，受检长度770mm、工件厚度20mm;

2) 焊缝内部缺陷(TOFD)检测413组，抽检比例25%，焊缝类别:一类焊缝、焊缝类型:环缝，检测等级A级，受检长度2000mm、工件厚度16mm;

3) 焊缝内部缺陷(UT)检测413组，抽检比例100%，焊缝类别:一类焊缝、焊缝类型:环缝，检测等级B级，受检长度7662mm、工件厚度20mm，;

4) 最终UT检测发现未焊透缺陷4处，其他检测均符合设计要求，依据本文构建的评估体系，结合设计技术要求，判定均为低风险缺陷，无极高风险缺陷。问题经

返工整改后结果符合设计要求，验证了检测与评估的准确性<sup>[4]</sup>。

#### 4.5 工程应用效果与经验总结

基于检测与评估结果，工程应用表明，多方法无损检测技术可实现引水管线钢管缺陷的全面精准识别，评估体系能科学划分风险等级，为运维决策提供可靠支撑，相比传统人工开挖检测方法，检测效率提升60%，缺陷识别准确率达95%以上，节省检测成本。经验总结为三点:一是检测方案需结合管线所处地域的气候、土壤、设计工艺、技术要求等工况差异化设计;二是相控阵超声与电磁感应等高端无损检测技术协同应用可互补检测盲区，提升检测可靠性;三是评估结果需与后期运维措施紧密结合，建立“检测-评估-修复-监测”长效跟踪机制，同类引水管线钢管的检测与评估提供宝贵实践经验。

#### 结束语

引水管线钢管安全运行关乎水资源输送保障，无损检测技术可精准检测其内部缺陷，科学评估体系能实现缺陷风险量化管控。本文构建了涵盖检测方法、评估指标、风险划分的完整体系，经工程实践验证可行有效。未来，人工智能与大数据技术将推动无损检测向自动识别、寿命预测发展，评估体系也将更智能动态。持续创新优化，可早发现、评估、处理缺陷，延长管线寿命，保障供水安全。

#### 参考文献

- [1]熊治军.王振庄.张振宇.智慧水务系统在城乡供水一体化工程中的应用案例[J].城镇供水, 2021(2):25-30.
- [2]张文科.基于“互联网”的城乡供水一体化建管服务模式改革探讨:以彭阳县智慧人饮工程为例[J].水利水电快报, 2020, 41(10):80-83.
- [3]龚旭.某引水工程输水管道穿越航道设计方案研究[J].工程与建设, 2023, 37(06):1715-1717.
- [4]黄玉.付巡.曹云娟.等.滇中引水二期配套工程昆明1段施工特点分析[J].云南水力发电,2025,41(03):118-122.