

# 灌溉渠道老化病害识别与维修养护技术优化研究

聂健祥 潘纪成

汉中市石门水库管理局 陕西 汉中 723000

**摘要:**灌溉渠道作为农业水利基础设施的核心组成部分,其运行状态直接关系到国家粮食安全、水资源利用效率和农业可持续发展。然而,受自然环境侵蚀、材料性能退化及管理维护不足等多重因素影响,大量既有灌溉渠道正面临不同程度的老化病害问题,严重制约了其功能发挥。本文系统梳理了当前灌溉渠道老化病害的主要类型、成因及其危害,并深入探讨了传统与新兴的病害识别技术。在此基础上,针对现有维修养护技术存在的成本高、效率低、耐久性差等问题,从材料科学、结构工程、智能监测和全生命周期管理等多个维度,提出了系统性的优化策略。研究表明,融合高精度智能感知、大数据分析先进修复材料的综合养护体系,是提升渠道运维效能、延长工程寿命、保障农业用水安全的关键路径。本研究旨在为我国灌区现代化改造与高质量发展提供理论支撑与实践指导。

**关键词:**灌溉渠道;老化病害;智能识别;维修养护;技术优化

## 引言

水为农业命脉,灌溉渠道是输送命脉的主动脉。新中国成立以来,我国建成庞大灌溉渠系网络,支撑近五分之一人口的粮食生产。但上世纪中后期建设的水利工程如今普遍“老龄化”,据水利部统计,全国大型灌区骨干渠道中超60%衬砌渠道运行超30年,存在裂缝、渗漏等多种病害,输水效率低、浪费水资源,还引发安全事故,威胁农业生产。传统渠道维修养护依赖人工巡检,主观性强、效率低,难发现隐蔽病害,且维修方案缺乏系统性与前瞻性,陷入“修了又坏”的恶性循环,耗费大量资源却难根治问题。在国家推进“藏粮于地、藏粮于技”战略和智慧水利建设背景下,精准高效识别渠道老化病害,构建科学、经济、耐久的维修养护技术体系,成为亟待解决的重大课题。

### 1 灌溉渠道老化病害类型、成因及危害分析

灌溉渠道的老化病害是一个复杂的系统性问题,其形成是内因(材料、结构)与外因(环境、荷载)长期相互作用的结果。主要病害类型可归纳为以下几类:

#### 1.1 衬砌结构病害

这是最为常见且直观的病害形式,主要包括:(1)裂缝:可分为干缩裂缝、温度裂缝、不均匀沉降裂缝及荷载裂缝等。干缩裂缝源于混凝土或砌体在硬化过程中水分蒸发;温度裂缝由昼夜或季节温差引起热胀冷缩应力所致;不均匀沉降裂缝则因渠基土质差异或地下水位变化导致基础变形不协调而产生。裂缝不仅破坏结构整体性,更是渗漏的主要通道。(2)剥落与起鼓:多发生在冻融循环频繁地区。冬季,渗入衬砌内部的水分结冰膨胀,对孔隙壁产生巨大压力,反复作用下导致表层砂

浆或混凝土剥落、起鼓,最终形成空洞。(3)错台与滑塌:通常由渠基失稳或边坡土体滑移引起。当渠基承载力不足或遭遇强降雨、地震等外力扰动时,衬砌板块可能发生相对位移(错台),严重时可导致整段渠道滑塌,中断输水。

#### 1.2 渗漏病害

渗漏是渠道老化最核心的危害,其根源在于衬砌结构的完整性被破坏。除了上述裂缝、孔洞等直接原因外,伸缩缝止水失效、施工冷缝处理不当、渠底反滤层淤堵失效等也是重要诱因<sup>[1]</sup>。严重的渗漏不仅造成宝贵的水资源浪费(据统计,未衬砌或老化渠道的渗漏损失率可达30%-50%),还会抬高渠周地下水位,引发土壤次生盐渍化,破坏周边环境。

#### 1.3 冲刷与磨蚀病害

在渠道弯道、跌水、陡坡等水流流速较大或流态紊乱的部位,高速水流携带的泥沙颗粒会对渠床和渠坡产生持续的冲击和磨蚀作用,导致衬砌材料逐渐被剥离、掏空,形成冲坑。若不及时处理,冲刷范围会不断扩大,最终危及渠道结构安全。

#### 1.4 生物侵蚀病害

渠道长期处于潮湿环境中,为藻类、苔藓、植物根系等生物提供了生长条件。这些生物体一方面分泌有机酸腐蚀衬砌材料,另一方面其根系可深入微裂缝中,通过生物楔裂效应加速裂缝扩展。此外,鼠类等动物在渠堤上打洞筑巢,也会形成渗漏通道,削弱堤防稳定性。

#### 1.5 基础与地基病害

渠基土体的湿陷、液化、冻胀等物理性质变化,是导致上部衬砌结构变形破坏的根本原因。例如,在黄土

地区,遇水后渠基发生湿陷,引发衬砌开裂;在高寒地区,渠基土冻结膨胀,融化后沉降,形成反复的冻融循环破坏。

这些病害相互关联、互为因果,共同构成了一个复杂的病害网络。其最终危害表现为:输水能力下降、水资源浪费、运行成本增加、工程寿命缩短,甚至可能诱发溃渠等重大安全事故,对区域农业生产和社会稳定构成严重威胁。

## 2 老化病害识别技术现状与发展

准确、高效的病害识别是科学制定维修养护方案的前提。传统的识别方法正逐步与新兴技术融合,形成多层次、立体化的诊断体系。

### 2.1 传统人工巡检

这是目前应用最广泛的方法,依赖巡检人员的经验,通过目视、敲击、尺量等方式进行。其优点是灵活、成本低,但缺点十分突出:一是主观性强,对细微或隐蔽病害(如内部空洞、早期裂缝)难以发现;二是效率低下,面对绵延数百公里的渠系,全覆盖巡检耗时耗力;三是安全性差,在高边坡、深渠段作业存在风险;四是数据难以量化和追溯,不利于长期趋势分析。

### 2.2 地面辅助检测技术

为弥补人工巡检的不足,一系列地面辅助设备被引入:(1)地质雷达(GPR):利用高频电磁波探测衬砌结构内部的分层、脱空、空洞及钢筋分布情况,具有无损、快速、分辨率较高等优点,是检测隐蔽病害的有效手段。(2)红外热成像:基于渗漏水与周围介质的热容差异,在特定时段(如昼夜温差大时)可清晰显示渗漏区域的温度异常,实现非接触式渗漏定位<sup>[2]</sup>。(3)无人机(UAV)巡检:搭载高清可见光、多光谱或激光雷达(LiDAR)相机的无人机,可高效获取渠道全线的高分辨率影像和三维点云数据。通过图像识别算法,可自动识别裂缝、植被覆盖、滑塌等地表病害,极大地提升了巡检的广度和效率。

### 2.3 智能感知与在线监测技术

面向未来智慧灌区建设,布设固定式传感器网络进行长期、实时监测成为趋势:(1)分布式光纤传感(DTS/DAS):将光纤作为传感器埋入或粘贴于渠道关键部位,可连续监测长达数十公里范围内的温度(DTS)、应变和振动(DAS)信息,对渗漏、结构变形、外部入侵等事件实现精确定位和预警。(2)物联网(IoT)传感器:部署土壤湿度、水位、倾角、裂缝计等微型传感器,通过无线网络将数据实时回传至云端平台,构建渠道健康状态的“数字孪生”模型,为预测性维护提供数据基础。

## 2.4 数据融合与智能诊断

单一技术手段往往存在局限性。未来的发展方向是将来自无人机、GPR、光纤、IoT等多种异构数据源的信息进行融合,并利用人工智能(AI)技术进行深度挖掘。例如,采用卷积神经网络(CNN)对无人机影像进行裂缝自动分割与量化;利用长短期记忆网络(LSTM)分析历史监测数据,预测病害发展趋势;通过知识图谱技术,将病害特征、成因、环境因素等关联起来,构建专家诊断系统,辅助决策。

## 3 维修养护技术优化策略

针对识别出的各类病害,维修养护技术的优化应遵循“因地制宜、标本兼治、经济耐久、绿色环保”的原则,从材料、工艺、管理和理念四个层面进行系统性创新。

### 3.1 新型修复与防护材料的应用

材料是决定维修效果和长期耐久性的核心要素。传统水泥基材料在应对复杂的老化病害时已显乏力,因此,开发和应用新型高性能材料成为必然选择。高性能聚合物改性水泥基材料通过在传统砂浆中掺入丙烯酸酯、EVA等聚合物乳液,能够显著提升修复材料的粘结强度、抗渗性、柔韧性以及抗冻融循环能力,使其特别适用于裂缝修补和表面防护等场景。更具前瞻性的自修复材料,如微生物自修复混凝土和微胶囊自修复涂层,则代表了材料科学的前沿方向。前者利用特定细菌在裂缝处诱导生成碳酸钙沉淀来实现微裂缝的自主愈合;后者则通过在涂层中预埋含有修复剂的微胶囊,在涂层受损破裂时释放修复剂并固化,从而完成自我修复。这类智能材料的应用有望从根本上延长渠道结构的服役寿命,大幅减少后期的维护频率和成本<sup>[3]</sup>。此外,响应生态文明建设的要求,生态友好型材料如透水性生态混凝土、植生混凝土等也应得到推广,它们在满足基本工程功能的同时,能够促进渠道与周边自然环境的和谐共生,实现工程效益与生态效益的统一。

### 3.2 先进施工工艺与装备的集成

先进施工工艺与专用装备的集成应用,是提升维修效率和工程质量的关键保障。对于穿越城镇或生态敏感区的地下输水涵管,非开挖修复技术(如原位固化法CIPP、螺旋缠绕法等)展现出巨大优势,它无需进行大规模的地表开挖,即可在原有管道内部形成一层坚固的新内衬,具有施工扰民少、工期短、综合成本低等显著优点。在明渠维修领域,研发和应用渠道专用的自动化喷涂机器人、裂缝智能注浆机器人等智能化装备,能够实现复杂工况下的精准、高效、标准化作业,有效降低对熟练技工的依赖,并确保施工质量的高度一致性。同

时,借鉴建筑工业化理念,推广预制装配技术也是一条可行路径。在工厂内预制标准化的渠道衬砌构件(如U型槽、矩形板),然后运至现场进行快速拼装,这种方式不仅质量可控、施工速度快,而且特别适用于需要进行大规模、标准化更新改造的灌区项目。

### 3.3 基于全生命周期的养护管理模式

要彻底改变过去“重建设、轻管理”的传统观念,就必须建立起覆盖工程规划、设计、施工、运行、维护直至最终报废全过程的全生命周期管理体系。这一体系的核心在于推行预防性养护,即根据渠道的服役年限、材料性能的衰减规律以及实时监测数据,科学制定周期性的预防性养护计划,例如定期清淤、表面密封处理、伸缩缝维护等,旨在将病害扼杀在萌芽状态,其投入的成本远低于事后的应急大修<sup>[4]</sup>。同时,需要建立一套科学、量化的渠道健康状态评估指标体系,依据评估结果对渠道资产进行分级管理(如划分为完好、轻微病害、中度病害、严重病害等级别),并据此实施差异化的养护策略和资源投入,真正实现精准、高效的养护。这一切的实现,都离不开一个强大的数字化资产管理平台作为支撑。该平台应深度融合BIM(建筑信息模型)、GIS(地理信息系统)和IoT(物联网)技术,集成渠道从蓝图到现状的全部信息,包括设计图纸、施工日志、历次巡检与维修记录、实时监测数据等,形成一份动态更新的、完整的“电子档案”,为所有养护决策提供全面、及时、可靠的数据支持。

### 3.4 多目标协同的综合治理理念

未来的渠道维修养护工作,不应仅仅局限于恢复结构安全这一单一目标,而应树立起多目标协同的综合治理理念。首先,必须坚持“节水优先”的原则,将最大限度地减少渗漏损失作为所有维修措施的核心导向。例如,在进行防渗修复的同时,可以结合渠道断面的水力优化设计,通过减小过水湿周等方式,进一步降低沿程水力损失,实现双重节水效益。其次,要注重生态融合,在满足基本防渗和结构安全要求的前提下,鼓励采用生态

护坡、复式断面等更具生态友好的工程形式,为水生生物创造栖息空间,增强渠道的生态服务功能,使其成为流动的生态廊道。最后,要实现智慧赋能,将具体的维修养护工作深度融入智慧灌区的整体建设框架之中。通过运用大数据分析和人工智能算法,对渠道的健康状态进行动态评估和趋势预测,推动养护模式从传统的“被动响应”向先进的“主动预测”转变,最终达成安全、高效、绿色、智能的综合管理目标。

## 4 结语

灌溉渠道老化病害是长期性、系统性挑战。本文系统分析病害成因与危害,梳理技术演进路径,提出综合优化策略。研究结论显示,未来灌溉渠道维修养护技术将呈现四大趋势:一是感知智能化,无人机、物联网等智能感知技术成主流,实现全方位高精度监控;二是决策数据化,依托大数据和人工智能构建评估预测模型,养护决策靠数据支撑;三是修复绿色化,环保耐久、自修复新型材料广泛应用,推动绿色可持续发展;四是管理一体化,全生命周期数字化资产管理平台打破信息孤岛,实现各环节无缝衔接。展望未来,随着“新基建”和“双碳”目标推进,灌溉渠道维修养护将成为智慧水利和生态文明建设重要部分,通过持续创新变革,让老化“水利动脉”焕发新生,为国家水安全和粮食安全筑牢屏障。

## 参考文献

- [1]王博宇,祝彦知,刘永志,等.在役引水渠道安全稳定性评价与病害治理[J].人民黄河,2022,44(12):139-142+146.
- [2]张祥吉,高明国,刘龙腾.输水渠道混凝土结构病害治理浅述[J].山东水利,2021,(07):15-16.
- [3]侯高升,吴云飞.水利工程渠道运行维护与管理的常见问题及对策[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(32):196-198.
- [4]王娟.农田水利灌溉渠道工程的运行维护及管理[J].水上安全,2025,(14):22-24.