

复杂地质条件下灌溉引水隧洞渗漏处理技术研究

李杰 李汝献

山东省枣庄市台儿庄区，枣庄大禹水利工程有限公司，277400；

摘要：本文针对复杂地质条件下灌溉引水隧洞渗漏问题开展研究，通过实地调查和工程案例分，系统探讨了引水隧洞渗漏的成因机制、危害性及其处理方法。研究表明，复杂地质条件下的隧洞渗漏主要受围岩结构、地下水活动、施工质量等多重因素影响。基于渗漏特征和工程实践，提出了以帷幕灌浆、裂缝封堵、防水层修复为主的综合治理技术体系。研究结果对于指导灌溉引水隧洞的渗漏治理和长效运行维护具有重要的理论意义和工程价值，可为类似工程提供技术支持和经验借鉴。

关键词：引水隧洞；渗漏处理；帷幕灌浆；裂缝封堵；防水层修复

DOI：10.69979/3060-8767.24.2.045

1 引言

灌溉引水隧洞是水利工程中重要的输水建筑物，其安全运行直接关系到农业灌溉和工农业用水的可靠性。在复杂地质条件下，隧洞渗漏问题普遍存在，不仅影响工程使用效益，还可能诱发工程事故^[1]。随着我国水利工程建设规模的不断扩大，隧洞渗漏处理技术研究显得尤为重要。目前，国内外对于隧洞渗漏处理已进行了大量研究，开发了多种处理技术和方法，但在复杂地质条件下的适用性和可靠性仍需深入研究。特别是在断层破碎带、岩溶发育区等复杂地质条件下，传统渗漏处理技术往往难以取得理想效果。本文结合工程实践，深入探讨了复杂地质条件下灌溉引水隧洞渗漏的处理技术，以期类似工程提供技术支持。

2 隧洞渗漏机理分析

2.1 地质构造影响因素

复杂地质条件下的隧洞渗漏现象与地质构造密切相关。在断层破碎带区域，岩体破碎程度高，裂隙发育，容易形成地下水通道。断层破碎带不仅改变了原有岩体的完整性，还往往伴随着含水断层泥的存在，使得渗漏问题更加复杂^[2]。节理裂隙的发育程度、产状特征和连通性直接影响围岩的渗透性。研究表明，当节理倾角在 $45^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 范围内时，渗漏问题最为严重。在岩溶发育区，溶洞和溶蚀裂隙的存在极大地增加了渗漏治理的难度，特别是当溶洞与地下水位交汇时，往往形成高压渗漏点。

2.2 水文地质条件影响

水文地质条件是影响隧洞渗漏的另一重要因素。地下水位的高低直接决定了渗漏水压力的大小，而地下水

位的季节性变化则导致渗漏强度呈现周期性特征。在强对流地带，地下水运动加剧了围岩的风化过程，加速了渗漏通道的形成^[3]。地下水化学性质也会影响渗漏发展，特别是在碳酸盐岩区，地下水的溶蚀作用会逐步扩大裂隙，形成更大的渗漏通道。

2.3 工程因素分析

施工过程中的开挖扰动会改变原有应力场，导致围岩裂隙扩展。爆破施工可能在围岩中形成新的裂隙网络，为地下水渗流提供通道。支护时机的选择和支护参数的确定也会影响渗漏的发展^[4]。施工质量方面，防水层施工不当、衬砌混凝土质量不达标、施工缝处理不当等都可能成为渗漏源。运营期间，由于荷载作用和环境因素的影响，防水层和衬砌结构可能发生老化、破损，进一步加剧渗漏问题。

3 隧洞渗漏危害分析

3.1 结构安全危害

持续的渗漏会对隧洞结构安全产生多方面影响。渗漏水的长期侵蚀作用会溶蚀水泥基材料中的钙质成分，导致衬砌强度下降，耐久性降低。围岩中的流砂现象会在衬砌背后形成空洞，增加结构失稳风险。特别是在寒冷地区，渗漏水的冻融循环会加速衬砌劣化，导致开裂、剥落等病害。衬砌结构一旦出现损伤，会进一步加剧渗漏，形成恶性循环。

3.2 运行效益影响

从输水效益角度分析，渗漏造成的水量损失直接影响灌溉供水保证率。统计数据显示，严重渗漏段的输水损失率可达15%~25%，对灌区用水安全构成威胁。渗漏还会影响水流条件，增加水头损失，降低输水效率。在

输水隧洞交替出现干湿段的情况下,还可能引起水质问题,影响灌溉用水质量。

3.3 维护成本增加

隧洞渗漏会显著增加工程维护成本。对于已经出现渗漏的隧洞段,需要定期进行检查、评估和维修,这些工作往往需要停水进行,影响正常供水。在地下水位较高的地区,渗漏处理难度更大,维修费用更高。长期的渗漏问题会加速工程设施老化,缩短使用寿命,增加更新改造成本。

3.4 环境影响评估

隧洞渗漏对周边环境的影响不容忽视。持续的渗漏会改变地下水系统,可能导致地表沉降、地下水位下降等问题。在山区,渗漏引起的地下水系统改变可能影响植被生长,诱发滑坡等地质灾害。在城市地区,渗漏可能影响周边建筑物的安全,造成地面积水等环境问题。长期的渗漏还可能导致水资源浪费,影响区域水资源平衡。

4 渗漏处理关键技术

4.1 帷幕灌浆技术

帷幕灌浆是处理隧洞渗漏的重要技术手段,通过在隧洞周围形成防渗帷幕,阻断地下水渗流通道。根据地质条件和渗漏特征,可采用不同的灌浆方案。在断层破碎带区域,宜采用多排序孔帷幕灌浆,通过调整灌浆参数和灌浆材料,确保帷幕连续性。灌浆材料的选择需考虑围岩特性,普通水泥浆液适用于裂隙宽度大于 0.5mm 的情况,对于微细裂隙则需选用超细水泥或化学浆液。

灌浆压力的控制尤为关键,需根据围岩承载能力和地下水压力合理确定,避免造成新的裂隙。实践表明,采用分段、分序、分压灌浆工艺,可显著提高帷幕灌浆效果。具体参数方面,灌浆压力一般控制在 0.3~3.0MPa 范围内,灌浆孔间距宜为 1.2~2.0m,灌浆深度应超过渗流通道深度 1.5~2.0 倍。对于特殊地质条件,如强岩溶发育区,可采用复合帷幕灌浆,即在常规水泥浆液灌浆的基础上,补充化学浆液灌浆,提高处理效果。

4.2 裂缝封堵技术

针对衬砌裂缝渗漏,需采用系统的封堵处理技术。对于贯通性裂缝,采用压力注浆法进行封堵,注浆材料可选用环氧树脂、聚氨酯等高分子材料,具有良好的渗透性和粘结性。环氧树脂材料粘度应控制在 500~1500mPa·s,固化时间应根据施工条件合理调整,一般控制在 30~120 分钟。聚氨酯材料发泡倍率宜控制在 3~8 倍,以确保充分填充裂缝。

表面裂缝可采用表面封堵法,使用快硬水泥或专用堵漏材料进行处理。在寒冷地区,封堵材料还需具备抗冻融性能,抗冻等级不低于 F300。对于活动性裂缝,可采用柔性封堵材料,确保封堵效果的持久性。新型纳米改性封堵材料具有良好的渗透性和耐久性,适用于微细裂缝的处理。在处理过程中,应注意清理裂缝内杂物,必要时扩大裂缝断面,以提高封堵质量。

4.3 防水层修复技术

防水层是隧洞防渗的重要屏障,其完整性直接影响渗漏治理效果。针对防水层破损,可采用局部修补或整体修复方案。局部修补适用于破损范围较小的情况,采用可与原防水层匹配的材料进行修复。修复材料应具备良好的变形适应性,断裂伸长率不低于 300%,抗拉强度不小于 2.0MPa。

对于大面积损坏,需采用整体修复方案,可选用喷涂式防水材料或防水卷材。新型防水材料如高分子防水涂料、自粘防水卷材等,具有较好的适应性和耐久性。喷涂聚脲防水涂料具有快速固化、高强度、高韧性等特点,涂层厚度通常控制在 2~4mm。在修复过程中,基面处理质量至关重要,需彻底清除松散物和污染物,确保新旧材料有效结合。基面平整度偏差应控制在 3mm 以内,含水率不应超过 8%。

4.4 智能监测技术

为实现渗漏治理的精准化和长效化,需建立完善的监测系统。采用光纤传感、声发射等新技术,可实现对渗漏位置和渗漏量的实时监测。分布式光纤测温系统可实现 0.1℃ 的温度分辨率,1m 的空间分辨率,能够准确定位渗漏点。声发射监测技术通过分析渗漏水流产生的声信号,可实现渗漏的早期预警。

通过埋设渗压计、位移计等仪器,监测围岩稳定性和衬砌变形。监测点布置密度应根据工程重要性确定,关键段落的监测点间距不宜大于 20m。建立监测数据分析模型,预测渗漏发展趋势,为维护决策提供依据。在重点渗漏段,可设置自动报警系统,当监测参数超过预警值时,系统自动发出警报。监测数据的采集频率应根据工程状态动态调整,一般情况下每天不少于 4 次,出现异常时可提高采集频率。

5 工程应用实例分析

5.1 工程概况

某灌区引水隧洞全长 8.6 公里,断面尺寸为 3.5m × 4.0m,设计引水流量 15m³/s。隧洞采用钢筋混凝土衬砌结构,衬砌厚度 300mm,混凝土强度等级 C25。隧洞穿越复杂地质区段,包括断层破碎带、溶洞发育带等不

良地质条件。地下水位高出隧洞顶部 15~35m, 最大水压达 0.35MPa。运行期间出现多处渗漏, 严重影响工程安全和灌溉供水。隧洞沿线共布设观测点 156 个, 其中重点监测段落 38 个。

5.2 渗漏特征分析

通过现场调查和监测发现, 渗漏点主要集中在断层破碎带穿越段和岩溶发育区, 渗漏水量随季节变化明显。最大单点渗漏量达到 2.5L/s, 局部段落累计渗漏量超过 10L/s。渗漏水的水 pH 值在 7.2~8.5 之间, 含有较高的钙镁离子, 表明与岩溶地下水有密切关系。衬砌裂缝宽度一般在 0.1~2.0mm 之间, 部分裂缝呈网状分布。

重点监测段落的位移监测数据显示, 衬砌最大径向变形达到 15mm, 超过设计允许值。渗压监测结果表明, 衬砌背后最大渗透水压达到 0.28MPa, 对结构安全构成威胁。实测渗漏量的年变化幅度为 35%~65%, 与降雨量和地下水位变化呈显著相关性。

5.3 处理方案实施

根据渗漏特征, 制定了综合治理方案。在断层破碎带采用帷幕灌浆技术, 灌浆孔间距 1.5m, 采用三排梅花形布置。灌浆材料选用普通硅酸盐水泥和超细水泥配制的双液浆, 水灰比为 0.8~1.2, 加入 1.5% 的减水剂和 0.8% 的膨胀剂。灌浆压力根据围岩情况分级控制, 第一序孔 0.5~1.0MPa, 第二序孔 1.0~1.5MPa, 第三序孔 1.5~2.0MPa。

对于衬砌裂缝, 采用环氧树脂压力注浆, 选用低粘度环氧树脂 (粘度约 800mPa·s), 并添加适量增韧剂。裂缝表面采用改性环氧胶泥封堵, 注浆压力控制在 0.3~0.8MPa。在防水层破损段, 采用喷涂聚脲防水涂料进行修复, 涂层厚度 2.5mm, 搭接宽度不小于 100mm。基面采用高压水枪清理, 并进行打磨处理, 确保粘结强度达到 1.2MPa 以上。

工程同步建设了智能监测系统, 包括 48 个渗压计、36 个位移计和总长度 3.2 公里的光纤测温系统。监测数据通过 GPRS 网络实时传输至监控中心, 建立了基于大数据分析的预警模型。当监测参数超过预警值的 80% 时, 系统自动发出预警信息。

5.4 效果评价

治理工程完成后进行了为期一年的跟踪监测, 结果表明处理效果显著: 主要渗漏段的渗漏量减少 85% 以上, 单点最大渗漏量由 2.5L/s 降至 0.3L/s 以下, 降雨期间渗漏量变化幅度降至 15% 以下; 工程质量检测显示帷幕灌浆充实度达 85%~95%, 灌浆体抗压强度 8.5~12.8MPa,

裂缝充填度 90% 以上, 防水层修复段各项指标均满足设计要求; 结构安全性能明显改善, 最大渗压降至 0.12MPa, 衬砌最大径向变形减至 6mm, 光纤测温系统显示渗漏点温度异常现象基本消除; 年输水损失减少约 420 万立方米, 创造经济效益 126 万元, 经过汛期考验, 工程总体防渗效果良好, 为灌区供水安全提供了可靠保障。

5.5 运行维护建议

基于工程实践经验, 提出以下运行维护建议: (1) 建立定期检查制度, 每季度进行一次全面检查, 重点关注渗漏治理段的变化情况; (2) 完善监测数据分析系统, 建立渗漏量与降雨量、地下水位的关联模型, 提高预警准确性; (3) 储备必要的防渗材料和施工设备, 确保发现问题后能及时处理; (4) 定期开展运行维护人员的技术培训, 提高故障诊断和处理能力。

6 结论

通过对复杂地质条件下灌溉引水隧洞渗漏处理技术的研究和工程实践表明, 隧洞渗漏具有多发性、复杂性和季节性特点, 渗漏成因与地质构造、水文条件和工程因素密切相关, 需要采用系统化的治理方案。帷幕灌浆、裂缝封堵和防水层修复等综合治理技术能够有效控制渗漏, 关键是要根据具体工程条件优化技术参数。智能监测技术的应用为渗漏治理提供了可靠的数据支持, 是实现长效维护的重要保障。工程实践证明, 采用综合治理技术后, 渗漏量减少 85% 以上, 输水损失显著降低。建议进一步开发新型防渗材料和施工工艺, 完善智能监测和预警系统, 建立渗漏治理效果评价体系, 为确保灌溉引水工程安全运行提供技术支持。

参考文献

- [1] 徐守刚, 罗延辉. 输水系统混凝土衬砌防渗灌浆施工及效果分析[J]. 水电站机电技术, 2022, 45(03): 150-152.
- [2] 谢武, 江志安, 李春鹏, 等. 引水工程隧洞渗漏处理技术研究[C]//中国水利学会地基与基础工程专业委员会. 2021 水利水电地基与基础工程技术创新与发展. 中国水电基础局有限公司; 天津市地基与基础工程企业重点实验室; , 2021: 9.
- [3] 张达, 陈亮, 肖承京, 等. 潘口水电站引水隧洞渗漏缺陷处理技术研究[J]. 中国建筑防水, 2019, (03): 41-44.
- [4] 张山勇. 新疆 ABH 某一级电站地下工程特殊地质处理实例剖析[J]. 陕西水利, 2019, (02): 123-125+129.