抽水蓄能电站引水洞渗漏防治与质量控制技术研究

苟 斯

中国能建葛洲坝三峡建设工程有限公司 四川 成都 610000

摘要: 本文概述了抽水蓄能电站引水洞的结构与功能、施工环境与特点,分析了导致引水洞渗漏的地质、施工和运行管理因素,并深入研究了施工质量控制体系建立、关键施工环节的质量控制以及质量问题的预防与处理等质量控制技术。提出了渗漏监测系统的构建、渗漏评估方法及监测数据的应用等渗漏监测与评估技术,为抽水蓄能电站引水洞渗漏问题的防治提供了全面的技术参考。

关键词: 抽水蓄能电站; 引水洞; 渗漏防治; 质量控制; 技术研究

1 抽水蓄能电站引水洞概述

1.1 引水洞的结构与功能

抽水蓄能电站引水洞,作为大型地下水利工程的核心构成,其结构精妙地划分为进口、洞身及出口三大区间。进口区域,装备有精密的闸门调控系统,精准调节水流动态;洞身部分,普遍采用圆形或马蹄状断面,辅以坚固的混凝土衬砌或先进的喷锚支护技术,确保在极端水流与地质压力下的稳定性;而出口区,则无缝对接厂房或下水库,确保水流顺畅过渡,实现水能的高效转化与储备。引水洞在电站运营中扮演着能量传输枢纽的角色,其结构完整与水密性能,直接关乎电站的稳定运行与效能发挥。

1.2 施工环境与特征

抽水蓄能电站引水洞深嵌于地下岩层,施工环境复杂多变,地质挑战尤为突出,如断层破碎带的穿越、高地应力的应对及涌水问题的防控,均对施工构成严峻考验。加之地下作业空间局促,通风、照明及排水系统的建设与维护难度增加,进一步抬升了施工难度^[1]。

施工特征鲜明:首先在于工程规模宏大,洞线绵延数千米,施工周期冗长;技术门槛高,要求精确控制洞室开挖尺寸与衬砌质量,确保结构稳固与水密无忧;安全风险系数大,地质条件与施工工艺的双重影响,使得塌方、涌水及渗漏风险陡增;另外,多工种交叉作业频繁,开挖、支护与衬砌等工序紧密衔接,对施工组织的协调与管理提出了更高要求。

2 抽水蓄能电站引水洞渗漏原因分析

2.1 地质因素

地质条件是引水洞渗漏问题不可忽视的重要因素,断层破碎带、岩溶地貌等地质构造复杂区域,岩石破碎、裂隙纵横,为水流提供了便捷的渗透路径。特别是在岩溶地区,溶洞与暗河交织,一旦引水洞穿越此类地质构造且处理不当,渗漏风险显著上升。岩层面、节理等

自然结构面,若与洞室相交且充填物质透水性良好,同样可能成为渗漏的隐患源。

2.2 施工环节的挑战

施工过程中的不当操作也是导致引水洞渗漏的关键因素,洞室开挖时,若采用不合理的爆破方法,强烈震动易使围岩产生新裂隙,损害岩石结构的完整性,进而降低抗渗性能。衬砌施工质量直接关系到防渗效果,混凝土浇筑中的缺陷,如蜂窝、麻面、空洞,以及衬砌厚度不足、强度不达标,均为渗漏提供了可乘之机。施工缝与变形缝的处理同样关键,止水带安装不规范、密封材料选用不当,都会使这些部位成为潜在的渗漏通道。灌浆作业的质量亦至关重要,灌浆压力不足、浆液扩散范围有限或材料选择不当,均难以有效封堵裂隙,实现理想的防渗目标。

2.3 运行管理的疏忽

引水洞在运行管理阶段的不当维护,同样可能诱发或加剧渗漏问题。长期水流冲刷与磨损,会逐渐侵蚀衬砌表面,导致裂缝、剥落等现象,削弱防渗功能。若运行状态监测体系不完善,无法及时发现并处理微小渗漏,渗漏范围会逐渐扩大。电站检修期间,对引水洞的检查不够细致全面,或维修措施执行不彻底,也会使得渗漏问题反复出现^[2]。另外,运行过程中遭遇超设计水位、超设计流量等异常情况,将增加引水洞荷载,可能触发新的渗漏点,给电站安全稳定运行带来威胁。

3 抽水蓄能电站引水洞渗漏防治技术

3.1 防渗灌浆技术

灌浆防渗技术,通过向岩体或混凝土结构的裂隙、孔隙中高压注入浆液,待浆液凝固后,形成一道致密的防渗帷幕,有效隔绝水流渗透。该技术涵盖水泥灌浆、化学灌浆及混合灌浆等多种类型。水泥灌浆凭借其广泛的材料来源、低廉的成本及高强度特性,在中、大粒径裂隙防渗处理中展现出出色表现。施工时,需精细规划灌

浆孔布局、灌浆压力及顺序等关键参数，确保浆液充分渗透裂隙。化学灌浆则凭借优异的流动性和可灌性，成为细小裂隙和孔隙防渗的首选，尽管成本稍高且需注意环境影响。混合灌浆则巧妙结合两者优势，可根据工程实际需求灵活选用。

3.2 高压喷射固化防渗技术

高压喷射固化防渗技术，利用高压水流或浆液射流的强大切割力，破坏地层结构，同时将水泥浆液与被切割地层颗粒融合，凝结成具备高强度和抗渗性能的固结体，实现防渗目标。该技术广泛适用于砂层、黏土、碎石土等多种地质条件，按喷射方式分为单管、双管及三管法，分别对应高压水泥浆液、高压水泥浆液+压缩空气、高压水+压缩空气+水泥浆液的喷射方式。形成的固结体整体性好、抗渗性强，施工时需精确调控喷射压力、提升及旋转速度，确保固结体质量。

3.3 衬砌表面防渗强化技术

衬砌表面防渗技术，通过处理引水洞衬砌表面，形成一层连续的防渗层，有效阻止水流渗漏。常见手段包括涂抹高性能防渗涂料、铺设高分子防渗膜等。防渗涂料以其出色的黏结性和抗渗性，施工便捷，适用于表面缺陷较少的衬砌。防渗膜则凭借卓越的防渗性能和耐用性，铺设时需确保与衬砌表面紧密贴合，接缝处严格密封。针对衬砌裂缝，可采用嵌缝封堵技术，先清理裂缝，再填充聚硫密封胶、聚氨酯等高性能密封材料，彻底阻断渗漏通道^[3]。

3.4 综合防渗策略应用

鉴于单一防渗技术往往难以应对复杂的渗漏挑战，综合防渗策略应运而生，即结合多种防渗技术的优点，形成联合防线。例如，对于地质复杂、渗漏严重的区域，可先采用高压喷射灌浆构建防渗帷幕，再辅以表面防渗技术，如涂抹防渗涂料或铺设防渗膜，构建多重防护体系。综合防渗策略能够最大化发挥各技术的优势，显著提升防渗效能，灵活适用于各类复杂渗漏情境。制定综合防渗方案时，需综合考虑地质条件、渗漏特性及工程需求，合理选择技术组合，确保方案既经济高效又安全可靠。

4 抽水蓄能电站引水洞渗漏质量控制技术研究

4.1 构建全面的施工质量管理体系

为确保引水洞施工品质并有效防范渗漏，首要任务是构建一个健全的施工质量管理体系。这涉及设定明确的质量控制目标，依据工程规范和设计要求，具体化质量指标，涵盖混凝土强度、防渗等级及灌浆合格率等。需制定并完善质量管理规章制度，明确原料检验、施工工序检验及质量责任划分，保证质量管理工作条理清晰。强化质量教育训练，提升施工人员的质量观念和技能水

平，确保施工遵循标准流程。同时设立质量监督岗位或机构，全程监督施工活动，迅速识别并纠正质量问题。另外，构建质量信息反馈机制，及时汇总、分析施工质量信息，为质量控制决策提供数据支持。

4.2 加强关键施工步骤的质量监管

依据详尽的地质勘探报告，合理选择开挖策略，如遇到复杂地质条件，可能需要结合多种开挖方法灵活运用，确保开挖轮廓线的精准无误和开挖尺寸的严格控制。任何微小的偏差都可能对后续施工造成不利影响，爆破作业中，不仅要考虑爆破效果，更要兼顾对围岩的最小化干扰，通过精确计算和调整爆破参数，采用微差爆破、光面爆破等先进技术，最大限度地保护围岩的原始结构完整，为后续衬砌和防渗工作奠定坚实基础。衬砌作业，作为防水体系的关键一环，对混凝土的品质控制要求极为严格；从原材料选择、配合比设计到搅拌过程，每一步都需严格遵循规范，确保混凝土的强度、抗渗性满足设计要求。浇筑过程中，采用分层浇筑技术，每层浇筑厚度适中，配合高频振捣，确保混凝土内部密实无空洞，表面平整光滑，有效避免蜂窝、麻面等常见缺陷。对施工缝和变形缝的处理要细致入微，严格按照设计图纸施工，确保止水带安装位置准确、固定牢靠，密封材料填充密实，形成连续的防水屏障；灌浆作业，作为提升整体防渗性能的重要手段，其质量控制同样不容忽视。施工前，对灌浆材料进行全面的物理化学性能测试，确保其满足特定工程需求。灌浆作业中，精确控制灌浆压力、浆液浓度、灌浆速率等关键参数，结合实时监测数据，灵活调整灌浆策略，确保灌浆效果均匀、饱满；灌浆结束后，通过压水试验、声波检测等多种手段，全面评估灌浆体的防渗性能，确保各项指标均达到或超过设计标准。

4.3 质量问题的预防与高效应对策略

预防质量问题，需从施工准备阶段就着手布局，制定详尽的施工组织设计和技术交底方案，确保每一位施工人员都能深刻理解工程特点、施工工艺流程以及严格的质量要求。原材料与构配件作为工程质量的基础，其质量控制不容放松，通过严格的进场检验程序，剔除一切不符合标准的产品，从源头上杜绝质量隐患。施工过程中，强化工序质量检查，构建一套完善的自检、互检、交接检质量控制体系，每一道工序完成后均需经过严格检验，确保问题早发现、早处理，避免质量问题累积导致更大损失；针对混凝土裂缝、渗漏等潜在问题，制定前瞻性的预防措施，如通过优化混凝土配比、控制浇筑温度、加强后期养护等手段，有效减少裂缝产生的可能性；通过严格的检测手段验证处理效果，确保问题得到根本性解决，为引水洞工程的长期安全运行提供坚实保障。

5 抽水蓄能电站引水洞渗漏监测与评估技术

5.1 渗漏监测系统构建

渗漏监测系统需实现对引水洞全域的实时监测,涵盖数据采集、传输、处理和预警等环节。监测点的布置应结合引水洞的结构特点和渗漏风险区域,在断层破碎带、岩溶发育区、施工缝、变形缝等重点部位加密布设监测设备。常用的监测设备包括渗流量监测仪、水位传感器、压力传感器等;渗流量监测仪可直接测量单位时间内的渗流量,精度可达0.1L/h,安装于引水洞底部的集水沟或排水孔处;水位传感器用于监测洞外地下水位与洞内水位的差值,判断渗透压力变化;压力传感器则埋设于衬砌结构内,监测内水压力和围岩压力的分布情况。数据传输采用有线与无线相结合的方式,地下洞段优先采用光纤传输,确保数据稳定可靠;地表监测站可采用无线传输技术,实现数据的远程实时上传。监测中心配备数据处理服务器和可视化平台,对采集的数据进行分析处理,生成渗流量变化曲线、压力分布图等,当监测数据超过预警阈值时,自动发出声光报警^[4]。

5.2 渗漏评估方法

渗漏评估需结合监测数据、地质资料和工程实际,从渗流量、渗漏位置、渗漏发展趋势等方面进行综合分析。渗流量评估采用分级标准,根据引水洞的规模和运行要求,将渗流量划分为“轻微、中等、严重”三个等级。对于直径5米以上的引水洞,轻微渗流量通常小于5m³/h,中等渗流量为5-20m³/h,严重渗流量大于20m³/h。通过对比实际渗流量与分级标准,判断渗漏的严重程度。渗漏位置定位可采用多源数据融合方法,结合渗流量监测数据、压力传感器分布和地质构造图,初步确定渗漏区域;对于复杂渗漏点,可采用示踪剂技术,将荧光示踪剂注入可疑区域,通过监测示踪剂的流出位置和浓度,精准定位渗漏通道。某电站采用荧光示踪法,成功定位一处隐藏在断层破碎带内的渗漏点,误差小于1米。渗漏发展趋势评估通过分析历史监测数据,建立渗流量与时间的关系模型,预测未来渗流量的变化。若渗流量呈现持续增长趋势,说明渗漏通道在扩大,需立即

采取防治措施;若渗流量趋于稳定,且在允许范围内,可进行持续监测。

5.3 监测数据的应用

监测数据是制定渗漏防治方案的重要依据,通过分析监测数据可优化防治措施的针对性和有效性。当监测发现某区域渗流量突然增大时,结合压力传感器数据判断是否为新的渗漏通道形成,及时调整灌浆范围和参数;在渗漏治理后,通过监测数据评估防治效果。如采用防渗灌浆技术后,若渗流量下降至原来的10%以下,且持续稳定,说明防治效果显著;若渗流量下降不明显,则需分析原因,补充采取其他防治技术,长期监测数据可用于建立引水洞渗漏数据库,为同类工程的渗漏防治提供参考。通过总结不同地质条件下的渗漏规律,优化监测系统布置和评估方法,提升抽水蓄能电站引水洞渗漏监测的智能化水平。

结束语

综上所述,抽水蓄能电站引水洞的渗漏问题涉及多个方面,需采取综合防治与质量控制措施。通过深入研究渗漏原因和防治技术,结合实际工程应用,可以不断优化防渗方案和质量控制流程。未来,随着监测与评估技术的进一步发展,引水洞渗漏问题的防治将更加智能化和精准化,为确保抽水蓄能电站的安全、高效运行提供有力保障。

参考文献

- [1]史云吏,黄宇飞,郑越洋.阳江抽水蓄能电站引水水道竖井上弯段混凝土浇筑施工技术[J].现代隧道技术,2022,59(S1):1004-1008.
- [2]张学清,王炳豹,殷康等.洛宁抽水蓄能电站引水斜井TBM施工关键技术研究[J].水力发电,2022,48(02):81-87.
- [3]王树芳.碎石土大竖井室开挖施工技术——肃北县青羊沟水电站引水系统第IV标段调压井工程开挖施工[J].农业科技与信息,2020(20):53-54.
- [4]张军,李守巨,宁忠立,陆金琦,李怡婧.抽水蓄能电站引水斜井开挖采用TBM施工的研究[J].水电与抽水蓄能,2021,4(02):1-7.