

混凝土重力坝基础防渗灌浆施工方法探讨

朱敏铭

国能长源恩施水电开发有限公司 湖北 恩施 445000

【摘要】：混凝土重力坝依靠自身重量维持结构稳定，坝基防渗是控制扬压力、防止渗透破坏、保障大坝长期安全运行的关键技术环节。帷幕灌浆工艺成熟、防渗效果可靠，是重力坝基础防渗处理的核心手段。本文结合湖北省来凤县塘口电站大坝排水廊道渗漏治理工程实践，针对坝基裂隙发育、透水性不均、渗漏量大等问题，系统阐述混凝土重力坝基础防渗灌浆的设计要点、施工流程、关键控制技术与质量验收标准，总结形成适用于岩溶裂隙岩体的全封闭帷幕、分序加密、自上而下分段灌浆成套施工方法，可为同类中型混凝土重力坝防渗加固工程提供技术参考与实践依据。

【关键词】：混凝土重力坝；坝基防渗；帷幕灌浆；渗漏治理；施工技术；质量控制

DOI:10.12417/2705-0998.26.05.061

混凝土重力坝在水利水电工程中应用广泛，其结构安全直接关系到工程效益与下游安全。在长期运行过程中，受地质条件、施工质量、环境侵蚀及库水压力等因素影响，坝基易出现裂隙扩张、溶蚀发育、防渗体系失效等问题，进而引发严重渗漏、扬压力超限、岩体掏空失稳等病害，威胁大坝整体稳定。防渗灌浆能够通过浆液充填、胶结坝基岩体裂隙，形成连续可靠的防渗帷幕，有效截断渗流通道、降低渗透压力、增强岩体整体性，是解决坝基渗漏最常用且有效的工程措施。塘口电站大坝为中型混凝土重力坝，建成运行多年后排水廊道渗漏严重，坝基透水性差异大、无连续相对隔水层，亟须开展系统性防渗灌浆治理。本文以该工程为依托，对混凝土重力坝基础防渗灌浆施工方法进行探讨，旨在提升施工质量、优化工艺参数、保障防渗效果，为类似工程提供可复制的技术路径。

1 工程概况与防渗背景

1.1 工程基本情况

塘口水电站位于湖北省来凤县酉水干流，属于III等中型水利工程，大坝为混凝土重力坝，总库容 4050 万 m^3 ，最大坝高 37.6m，以发电为主，兼顾灌溉、旅游与水产养殖等综合功能。大坝坝基排水系统由灌浆廊道、排水暗涵及排水廊道组成，承担着降低扬压力、排除坝基渗水的重要作用。

1.2 渗漏问题与地质条件

经现场检测，坝基排水廊道渗漏量达 39.8~47.1L/s，存在多处集中渗漏点，廊道内部淤积严重、底板溶蚀坑洼，消力岸及下游护坦冲刷破坏明显。工程地质条件显示，坝址区岩体为灰岩，单斜构造，断层与裂隙发育，坝基透水率为 1.1~139Lu，无连续相对隔水层，渗透水源主要为坝后尾水及库水深层渗透，在高水位作用下易形成较大扬压力，长期渗漏还会导致裂隙充填物流失，严重影响坝基岩体稳定与大坝安全运行。基于上述问题，必须采取针对性的防渗灌浆处理，构建完整可靠的坝基防渗体系。

2 防渗灌浆设计要点

2.1 设计原则与帷幕布置

本次防渗灌浆以封闭渗流通道、降低坝基扬压力、恢复岩体整体性为核心目标，遵循安全可靠、经济合理、技术可行的原则进行系统设计。帷幕形式采用溢流坝段下游全封闭单排帷幕，形成连续防渗屏障，常规区域灌浆孔距为 2.0m，对右岸下 0+030~0+050 及 0+057~0+107 等裂隙密集、渗漏严重区段实施加密处理，孔距缩小至 1.5m。在帷幕布置过程中，充分结合坝基渗漏分布特点与地质勘察成果，以先导孔压水试验数据为依据，对帷幕轴线进行局部优化调整，确保防渗体系能够覆盖主要渗漏通道与高透水区域，避免出现防渗盲区。同时兼顾施工便利性与工程经济性，在满足防渗要求的前提下，合理控制帷幕长度与钻孔数量，降低工程造价与施工难度，提升整体方案的可实施性。

2.2 孔深与灌浆次序

帷幕深度按深入透水性 $\leq 5Lu$ 的相对不透水层以下 3m 控制，确保帷幕嵌入稳定隔水地层，提升长期防渗效果。在实际设计中，根据不同坝段地质条件差异，对孔深进行动态调整，地质条件相对完整、透水性较低区段适当减小孔深，裂隙发育、透水性较强区段适当加深孔深，保证帷幕底部均能进入可靠的相对不透水层，形成封闭完整的防渗体系。灌浆次序严格按照分序加密原则执行，每排孔分两序施工，先灌注 1 序孔控制主要渗漏通道，再灌注 2 序孔填补裂隙盲区，提高帷幕均匀性与密实性。分序施工能够有效避免相邻孔之间相互干扰，减少串浆、冒浆等问题发生，同时逐步提升岩体密实度与防渗能力，保证帷幕整体连续性与防渗效果。

2.3 材料与浆液设计

灌浆材料选用不低于 32.5 级的普通硅酸盐水泥，要求新鲜无结块、细度满足规范要求，浆液水灰比设 5:1、3:1、2:1、1:1、0.7:1、0.5:1 等多个比级，开灌采用 5:1 的稀浆，遵循由稀到浓逐级变换的原则，适应不同岩体的可灌性与吸浆特

性。材料进场前需进行严格检验，水泥需提供出厂合格证与复检报告，确保强度、安定性、细度等指标符合灌浆施工要求，严禁使用受潮、结块、过期水泥。浆液配合比通过室内试验确定，根据岩体裂隙宽度、渗透系数与吸浆量大小，灵活调整浆液浓度与流动性，保证浆液能够顺利渗入岩体深部裂隙，同时具备良好的稳定性与固结强度，避免浆液析水、沉淀，确保灌浆后形成完整、坚固的防渗结石体，满足长期防渗与结构稳定需求。

3 防渗灌浆关键施工工艺

3.1 施工准备与钻孔控制

施工前期需放空水库降低水位差，完成廊道清淤、场地清理与测量放样，确保孔位偏差小于5cm，钻机安装稳固、钻孔方向准确。施工前对排水廊道内淤泥、杂物进行全面清理，采用泥浆泵配合集水池沉淀处理，防止施工废料污染河道，同时搭建临时施工平台，保障钻孔、灌浆设备稳定作业。钻孔优先采用回转式钻机，搭配金刚石或硬质合金钻头，孔径控制在75~130mm，严禁使用冲击钻进，按照自上而下分段方式施工，第一段接触段长2m，第二段长3m，后续段长控制在5~6m，地质破碎段适当缩短段长。钻孔过程中严格控制孔斜率，最大偏差不得超过孔深的1%，每5~10m进行一次测斜，终孔段必须测斜记录，孔底残留物厚度不超过20cm。钻孔作业需全程记录进尺速度、冲洗液消耗量、岩层变化等数据，遇到断层、溶槽、涌水等特殊地段及时标记并上报，为后续灌浆施工提供准确依据。

3.2 冲洗与压水试验

钻孔完成后及时进行孔底冲洗与裂隙冲洗，冲洗压力采用该段灌浆压力的80%，至回水澄清后延续10min，确保孔内与岩体裂隙中的泥粉、碎屑等杂物被彻底清除，避免杂质堵塞裂隙影响浆液扩散与胶结效果。随后开展单点法压水试验，压力一般为0.3MPa，获取岩体透水率数据，为灌浆施工与效果评价提供依据。压水试验严格按照规范流程操作，稳定压水时间不少于20min，记录流量与压力数据，准确计算透水率，绘制灌前岩体渗透剖面。压水试验成果不仅是确定灌浆参数的重要依据，也是灌后质量检查的对比基准，能够直观反映灌浆前后岩体透水性变化，科学评价防渗处理效果，试验过程需全程记录，数据真实可靠，严禁随意修改与编造。

3.3 灌浆施工与特殊情况处理

灌浆施工优先采用孔内循环法，射浆管距孔底不大于0.5m，灌浆塞置于基岩面以上0.5m位置，段间搭接长度不小于0.5m防止漏灌。灌浆压力分段控制，第一段0.1~0.2MPa，第二段0.2~0.3MPa，以下每深入1m增加0.05MPa，以回浆管压力表读数为准。施工中根据压力与吸浆量变化合理变换浆液浓度，当压力稳定、吸浆量均匀减少时保持水灰比不变，当某

一二级浆液注入量达300L以上或灌注时间1h无明显变化时加浓一级，吸浆量大于30L/min时可越级变浓。针对冒浆、串浆、施工中断、涌水、溶槽等特殊状况，分别采用嵌缝封堵、低压浓浆、及时复灌、间歇灌浆、掺速凝剂、粗砾回填等措施处理，保证灌浆连续有效。施工过程中安排专人监测灌浆压力、流量、浆液比重，实时调整施工参数，遇到异常情况立即停机排查，处理完毕后方可继续施工，确保灌浆质量与施工安全。

3.4 结束标准与封孔工艺

灌浆结束执行严格标准，在设计压力下，吸浆量不大于0.4L/min并持续60min，或不大于1L/min持续90min方可终灌，封孔采用机械压浆法，分两段自下而上进行压力封孔，确保全孔充填密实、无空洞无松动。终灌前对浆液浓度、压力、吸浆量进行复核，满足结束标准后方可停止灌浆，严禁提前结束或随意更改结束条件。封孔作业是保证帷幕完整性的关键环节，采用1:1水泥浆液进行压力封孔，下段压力0.5MPa，上段压力1.0MPa，达到封孔结束标准后，换用0.8:1浓浆闭浆，确保钻孔内部充填密实，防止后期渗水沿钻孔通道渗透。封孔完成后及时清理孔口，做好孔口保护与标记，便于后续质量检查与工程维护。

4 施工质量控制与验收

4.1 全过程质量控制

质量控制贯穿灌浆全过程，实行三级检查制度，对原材料、设备、钻孔、冲洗、压水、灌浆、封孔等环节进行全过程监督与记录。建立完善的质量管控体系，明确各岗位质量责任，施工前对作业人员进行技术交底与安全培训，熟悉施工流程、参数要求与质量标准。水泥进场必须查验合格证并进行复检，不同品牌水泥不得混用，灌浆设备与压力表定期校验，误差控制在5%以内，确保设备运行稳定、数据准确。钻孔孔位、孔深、孔斜、段长严格按设计与规范执行，压水试验操作规范、数据真实，灌浆压力、浆液配比、变换时机、结束条件不得随意调整，特殊地段施工需经监理确认并留存详细记录。施工过程中做好原始记录，做到一机一表、一孔一档，记录内容完整清晰，可追溯、可核查，确保每一道工序均符合质量要求。

4.2 质量检查与验收标准

工程验收以检查孔压水试验为主要依据，检查孔数量为灌浆孔总数的10%，在相应区域灌浆完成14天后实施，布置在帷幕轴线孔间等具有代表性的位置，兼顾渗漏严重区、地质复杂区与常规区段，保证检查结果能够客观反映整体灌浆质量。防渗帷幕合格标准为透水率 $\leq 5Lu$ ，基岩接触段及下一段合格率100%，以下各段合格率不低于90%，同时结合岩芯采取率、浆液充填状况、施工过程资料进行综合评价。检查孔施工需取芯鉴定，观察岩芯完整性与浆液充填情况，对灌浆效果不佳、达不到设计要求的区域，及时进行补灌处理，直至合格为止。

施工完成后需整理完善全套成果资料,包括钻孔班报表、压水试验记录、灌浆记录表、原材料检测报告、成果一览表、平面与剖面图及施工技术总结,确保资料完整、真实、可追溯,满足工程竣工验收与后期运行管理需求。

5 工程应用效果与技术优势

塘口电站大坝基础防渗灌浆实施后,坝基渗漏量显著下降,排水廊道渗漏问题得到根治,廊道内干燥整洁,扬压力控制在设计允许范围内,坝基岩体完整性与稳定性明显提升,消力库及下游结构安全得到有效保障,工程恢复正常运行效益。该套施工方法的技术优势突出,全封闭帷幕能够有效截断渗流,适配无连续隔水层的岩溶裂隙岩体;分序加密灌浆可逐步提升防渗体均匀性,避免浆液流失与局部集中渗漏;自上而下分段灌浆便于控制压力、保护岩体、减少串浆冒浆,适合破碎与溶蚀发育地层;动态调整浆液浓度与灌浆压力,可适应不同地质条件与吸浆特性,保证可灌性与密实度;全过程质量控制

与压水试验检测相结合,实现防渗效果可监测、可验证、可追溯,整体技术成熟可靠、适用性强。

6 结论

混凝土重力坝基础防渗灌浆是一项系统性强、技术要求高的综合工程,直接决定大坝防渗能力与运行安全。以塘口电站渗漏治理工程实践表明,采用全封闭单排帷幕、分序加密、自上而下分段孔内循环灌浆的施工方法,能够有效解决灰岩坝基裂隙发育、透水性不均、渗漏量大的问题,可稳定达到透水率 $\leq 5Lu$ 的防渗标准,显著降低扬压力、增强岩体整体性,保障大坝长期安全稳定运行。施工中应结合地质条件开展先导孔与灌浆试验,优化孔距、段长、压力、浆液比级等关键参数,针对特殊地段采取专项处理措施,强化全过程质量管控与成果验收,完善监测体系与资料归档,全面提升防渗灌浆施工质量与工程耐久性。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部.SL/T 62—2020 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范[S].北京:中国水利水电出版社,2020.
- [2] 中华人民共和国水利部.SL 31—2018 水利水电工程钻孔压水试验规程[S].北京:中国水利水电出版社,2018.
- [3] 陈济美.帷幕灌浆施工技术在水库大坝除险加固工程的应用研究[J].水利科技与经济,2024,30(24):157-159.
- [4] 梅艺宾.水库除险加固工程大坝帷幕灌浆施工方法与质量控制[J].黑龙江水利科技,2022,50(06):176-178.