

抽水蓄能电站边坡综合治理与排水优化施工技术研究 ——以河北抚宁抽水蓄能电站下水库进出水口左岸边坡为例

韩贞强

中国水利水电第十一工程局有限公司

DOI：10.32629/jpm.v7i5.8893

[摘要] 抽水蓄能电站进出水口边坡作为输水发电系统的关键组成部分，其结构稳定性、抗冲刷能力与长期耐久性直接关系到电站整体安全运行。河北抚宁抽水蓄能电站下水库进出水口左岸边坡受天然冲沟汇流冲刷影响，存在坡面侵蚀、局部岩体风化破碎等问题，威胁边坡整体稳定与进出水口结构安全。本文依托该边坡增设排水沟与贴坡混凝土加固工程，系统阐述边坡开挖清理、挂网喷锚支护、贴坡混凝土浇筑、截排水系统施工等关键技术，从施工质量、安全防控、环保节能及应急保障多维度实施全过程统筹管控。工程实践表明，通过先完善截排水系统、再实施挂网喷锚支护、最后辅以贴坡混凝土补强的分步治理思路，可有效解决坡面冲刷、岩体风化、局部失稳等问题，实现边坡结构稳定、排水通畅、施工安全高效、环境友好的综合目标。研究成果可为国内同类抽水蓄能电站及水利水电工程岩质边坡治理提供可复制的技术路径与实践参考。

[关键词] 抽水蓄能电站；岩质边坡；边坡治理；喷锚支护；贴坡混凝土；截排水系统；施工技术；安全风险管控

Research on Comprehensive Slope Management and Drainage Optimization Construction Technologies for Pumped Storage Power Stations—A Case Study of the Left Bank Slope at the Inlet/Outlet of the Lower Reservoir of Hebei Funing Pumped Storage Power Station

Han Zhenqiang

China Water Resources and Hydropower Engineering Bureau No.11 Co., Ltd.

[Abstract] The slopes at the inlets/outlets of pumped storage power stations are critical components of water conveyance and power generation systems, where structural stability, erosion resistance, and long-term durability directly impact the overall safe operation of the station. The left bank slope at the inlet/outlet of the lower reservoir of Hebei Funing Pumped Storage Power Station is affected by natural gully convergence erosion, exhibiting issues such as slope surface erosion and localized rock weathering and fragmentation, which threaten both slope stability and the structural integrity of the inlet/outlet. This paper systematically discusses key technologies—including slope excavation and cleaning, mesh-and-sprayed anchorage support, slope lining concrete pouring, and drainage system construction—through the implementation of additional drainage ditches and slope lining concrete reinforcement. Comprehensive control measures are adopted across multiple dimensions, encompassing construction quality, safety management, environmental protection, energy efficiency, and emergency preparedness. Engineering practice demonstrates that a phased approach—first establishing a drainage system, then implementing mesh-and-sprayed anchorage support, and finally reinforcing with slope lining concrete—effectively addresses slope erosion, rock weathering, and local instability, achieving comprehensive objectives of structural stability, efficient drainage, safe and efficient construction, and environmental sustainability. The research findings provide replicable technical pathways and practical references for rock slope management in similar pumped storage power stations and hydropower projects nationwide.

[Key words] Pumped-storage power station; Rock slope; Slope stabilization; Shotcrete anchoring support; Slope-coating concrete; Drainage system; Construction techniques; Safety risk management

1 引言

河北抚宁抽水蓄能电站下水库进出水口左岸边坡原开挖

支护已完成，但现场揭露边坡与Y2路上方发育一条较大冲沟，汇流面积大、冲刷力强，长期作用下对进出水口边坡造成持续

侵蚀,影响结构安全与运行耐久性。为消除隐患,工程现场增设排水沟、贴坡混凝土、挂网喷锚联合加固处置,对边坡进行系统性综合治理。本文以该工程为实例,从工程概况、施工部署、关键工艺、质量安全、环保应急等方面展开研究,总结适用于高陡岩质边坡的综合治理技术,为同类工程提供支撑。

2 工程概况

2.1 工程背景与建设意义

河北抚宁抽水蓄能电站是区域电网重要的调峰填谷、调频调相及事故备用电源,对保障华北电网安全稳定运行具有重要作用。下水库进出水口为输水发电系统咽喉部位,左岸边坡紧邻进出水口结构,其稳定与否直接决定电站能否长期安全运行。原设计开挖支护完成后,冲沟汇流冲刷问题突出,雨水沿冲沟直接冲刷边坡体,造成表层土体流失、岩体风化加速,存在明显安全短板。为此,设计单位下达变更通知,在边坡开口线外增设排水沟,将冲沟来水引至库内死水位以下,并对开口线与排水沟之间区域实施清表、挂网喷锚及贴坡混凝土加固,形成完整坡面防护结构。

2.2 工程地质与水文气象条件

边坡地形整体较完整,地表坡度 $28^{\circ}\sim 42^{\circ}$,局部陡崖达 $65^{\circ}\sim 70^{\circ}$,属典型高陡岩质边坡。边坡上部覆盖第四系残坡积碎石土和风积粉土,厚度 $1\sim 7\text{m}$,结构松散、抗冲刷能力弱;出口明渠段覆盖层为第四系冲洪积层,厚度 $3\sim 13\text{m}$;下伏基岩为钾长花岗岩与混合花岗岩,岩质坚硬、完整性较好,边坡整体基本稳定。

工程区属暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,降水集中于夏季。据气象资料统计,流域多年平均气温 10.8°C ,极端最高气温 40.2°C ,极端最低气温 -25.5°C ;多年平均降水量 668.8mm ,多年平均蒸发量 950.9mm ;最大冻土深度 0.8m 。夏季短时强降雨易形成坡面汇流,沿冲沟快速下切,是造成边坡冲刷的主要诱因。

2.3 施工内容与主要工程量

本次施工核心内容包括:边坡清表与土石方开挖、系统锚杆施工、挂网喷射混凝土、排水孔施工、贴坡混凝土浇筑、排水沟混凝土衬砌等。主要工程量如下:土方开挖 106m^3 ,土方槽挖 293.1m^3 ,石方槽挖 10m^3 ;C25砂浆锚杆($L=4.5\text{m}$)89根;C25喷混凝土 121m^3 ;挂A8钢筋网 3.16t ;排水孔88m;PE50排水管22m;C25F300贴坡混凝土 328m^3 ;C25F300排水沟衬砌混凝土 85m^3 ;排水沟钢筋 1.6t ;贴坡混凝土钢筋 2.1t 。

2.4 施工目标

安全目标:杜绝五级及以上人身、电网设备、机械设备、火灾、环境污染、重大交通事故等事件,杜绝垮塌、冒顶、爆炸物品丢失事件,安全文明施工设施达标。

质量目标:不发生工程质量事故,杜绝较大质量缺陷;单元工程合格率100%,建筑工程优良率 $\geq 88\%$,机电及金属结构安装优良率 $\geq 93\%$,单位工程优良率100%,确保一次达标投产。

工期目标:开挖支护2024年8月1日—8月31日;排水沟施工2024年9月1日—9月30日;贴坡混凝土施工2024年10月1日—11月15日。

3 施工总体部署

3.1 施工平面布置

施工道路:设置两条进场线路。线路1:Y2公路→7号洞

→8号洞→下水库进出水口232平台;线路2:Y3公路→L7→L10→L9→L11公路。道路满足挖掘机、自卸车、汽车吊、混凝土罐车等大型设备通行。

施工供水:利用232平台既有水箱,采用 $\Phi 30\text{mm}$ 塑料管接至工作面,满足基面冲洗、混凝土养护、喷射混凝土等用水需求。

施工排水:作业面设置集水坑,集中收集施工废水与渗水,由排污车运至拌合站污水处理厂达标处理,禁止直排。

施工供电:利用下水库进出水口闸门竖井平台既有箱变,接动力电缆至配电柜,满足施工机械、照明、焊接等用电。

3.2 资源配置计划

资源配置计划涵盖设备、人员及材料三方面。设备方面,配置阿特拉斯锚杆钻机、凯斯360液压挖掘机(带破碎锤)、20t自卸车、混凝土罐车、全站仪、汽车吊、发电机、塔吊、雾炮、注浆机及逆变直流焊机等,满足开挖、支护、混凝土浇筑全流程作业。人员方面,投入钢筋工、模板工、混凝土工等共计48人,分班连续作业,保障施工进度。材料方面,钢筋、水泥、粉煤灰、外加剂、PE管、无纺布等提前进场检验并建立台账,确保连续供应。资源配置科学匹配、数量充足,为工程高效实施提供了基础保障。

4 关键施工技术与工艺流程

4.1 边坡开挖与清表施工

边坡开挖严格遵循自上而下、分层分段、严禁掏底开挖原则。首先采用全站仪放样开口线、变坡点及排水沟位置,误差控制在 $\pm 1\text{cm}$ 以内。使用反铲修建简易便道进入作业面,对开口线外5m范围及开挖区进行清表,清除树木、腐殖土、浮石、杂物,消除坠落隐患。符合表土标准的土料运至下库表土堆存场,无用料运至南沟渣场指定区域。靠近设计边线部位预留50cm人工修整层,反铲粗挖后人工配合修整,确保坡率平顺、轮廓达标,避免超挖与欠挖。

4.2 边坡喷锚网支护施工

支护采用锚杆+钢筋网+喷射混凝土+排水孔联合结构,是提高边坡整体性与抗风化能力的核心措施。

1. 锚杆施工:采用C25砂浆锚杆,长度4.5m,入岩4.15m,间排距 $1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ 梅花形布置。采用“先注浆后插锚杆”工艺:钻孔完成后高压风水联合清孔;注浆管插至孔底,回抽3~5cm后开始注浆;浆液满溢后缓慢旋转插入锚杆,确保孔内饱满无空鼓。锚杆材料采用HRB400级钢筋,水泥砂浆强度不低于M20。

2. 钢筋网铺设:采用A8钢筋,网孔 $20\text{cm}\times 20\text{cm}$,现场绑扎。先喷射3~5cm厚混凝土,再铺设钢筋网并与锚杆点焊连接,随后分层喷射至设计厚度15cm。

3. 喷射混凝土:采用湿喷工艺,C25混凝土,自下而上分段、分片喷射。喷头与坡面垂直,距离 $0.6\sim 1.2\text{m}$,螺旋形轨迹喷射。终凝2h后洒水养护,养护时间不少于14d,气温低于 5°C 时停止洒水。

4. 排水孔施工:孔径不小于56mm,孔深5.0m,仰角 10° ,孔内安装PE50排水管并外包无纺布,外露10cm,有效排出坡体内渗水,降低扬压力。

4.3 贴坡混凝土施工

贴坡混凝土采用C25F300抗冻混凝土,施工流程严谨。首先进行基面清理,反铲配合人工清除浮渣及松动岩块,经监理

验收合格后进入下道工序。钢筋在加工厂统一制作,塔吊吊装就位,人工绑扎并设置混凝土垫块,保证保护层厚度及间距准确。模板采用钢模板及双钢管背肋,确保刚度与稳定性,防止跑模漏浆。混凝土采用平铺法浇筑,层厚30~50cm,吊罐入仓且下料高度不大于1.5m;插入式振捣器“快插慢拔”,至表面泛浆无气泡。初凝12h后拆除堵头模板,终凝后洒水养护不少于14d,有效防止干缩裂缝。

4.4 排水沟施工

排水沟施工遵循“源头截流、顺畅导排”原则,布置于边坡开口线外不小于3m,底部纵坡不低于8%,确保冲沟来水安全引至库内死水位以下。沟槽采用液压锤破碎石方,挖掘机配合人工清底,控制断面尺寸与高程;钢筋按图加工,木模外撑加固保证线形顺直;混凝土由搅拌车运输、溜槽入仓,振捣密实并表面收光;初凝3h后潮湿养护不少于7d。全流程注重截排结合与结构耐久性,有效降低边坡水害风险。

5 质量控制体系与保障措施

5.1 质量管理体系

建立以项目经理为第一责任人、总工程师牵头、技术质量部主控、作业班组落实的质量保证体系,严格执行班组自检、作业队复检、项目部终检三检制度,每道工序验收合格后方可进入下道工序。

5.2 关键工序质量控制

关键工序质量控制涵盖测量、材料及施工全过程。测量采用全站仪精确定位,确保开口线、坡率及结构尺寸误差在规范内;原材料严格核验合格证并按频抽检,杜绝不合格品;锚杆孔位偏差 $\leq 100\text{mm}$ 、孔深 $\leq 50\text{mm}$,注浆密实且外露长度合规;喷射混凝土厚度均匀、无空鼓脱落,强度达标;混凝土则严控配合比、坍落度、浇筑温度与入仓速度,振捣密实以防止冷缝、蜂窝麻面。上述措施形成闭环管控,保障工程质量可靠性。

5.3 质量验收标准

执行《水电水利基本建设工程单元工程质量等级评定标准第1部分:土建工程》(DL/T5113.1-2019)、《水工混凝土施工规范》(DL/T5144-2015)等规范,确保单元工程合格率100%,优良率满足合同目标。

6 安全风险管控与应急处置

6.1 风险辨识与分级

采用LEC作业条件危险性分析法,对钢筋焊接、模板安拆、混凝土浇筑、施工用电、车辆运输、边坡开挖、高处作业等进行辨识,确定主要风险为:高处坠落、物体打击、触电、机械伤害、火灾、灼烫、边坡失稳等,风险等级均为四级可控风险。

6.2 安全防护措施

安全防护措施贯穿各高风险环节:高处作业须佩戴安全带与安全帽,设置防护栏杆及安全网,严禁共用安全绳;施工用电由专职电工操作,落实接地接零与漏电保护,潮湿环境加强绝缘;动火作业履行审批,易燃物间距不小于10m并配消防器材;机械作业持证上岗、定期检修,严禁超载超速;边坡开挖禁止掏底,每下降5m清坡检查并及时加固破碎带。上述措施形成系统化防护体系,有效降低施工安全风险。

6.3 应急保障体系

成立以项目经理为组长的应急领导小组,下设现场抢救、医疗救护、安全保卫、后勤保障、技术处理、善后处理等小组。

配备担架、急救药箱、氧气袋、应急灯具、安全带、警戒带、挖掘机、吊机等应急物资,确保24小时应急响应。

针对高处坠落、触电、机械伤害、火灾、高温中暑等制定专项应急预案,明确处置流程:事故发生→立即报警→启动预案→人员抢救→现场管控→善后调查,最大限度降低人员伤亡与财产损失。

7 环保、文明施工与职业健康

施工期的环境保护需构建责任明确的管理体系,通过设立专项领导小组,将环保职责嵌入施工各环节。弃渣须合规转运至指定渣场,杜绝随意倾倒;污水经集中处理后达标排放,严禁直排河道。机械应定期检修以防止油料泄漏,辅以雾炮降尘与噪声管控。完工后及时恢复植被,形成全过程生态防护闭环,实现工程与环境的协调发展。

8 工程实施效果与效益分析

经联合加固,边坡整体稳定性与抗冲刷能力显著增强,排水系统有效消除冲刷隐患。施工全程未发生安全事件,环境指标全面达标。工程在安全、质量、社会及生态层面协同获益:既保障电站长期运行,降低维护成本,又为同类项目提供技术借鉴,同时践行绿色施工,减少山体扰动,实现多目标统一。

9 结论与展望

9.1 结论

1. 针对高陡岩质边坡受冲沟冲刷问题,采用截排水布设、挂网喷锚支护、贴坡混凝土加固相结合的处置方式,可有效解决边坡风化、冲刷、局部失稳等病害。

2. 自上而下分层开挖、先注浆后插锚杆、湿喷混凝土、薄层连续浇筑等关键工艺,是保证工程质量的核心环节。

3. 施工全过程严控工序质量,强化安全风险防控,恪守绿色施工标准,落实应急保障举措,通过多维度综合管控,实现边坡工程安全、优质、高效、绿色施工。

4. 本工程实践可为国内抽水蓄能电站、水利、水电、交通等领域同类岩质边坡治理提供成熟技术与经验借鉴。

9.2 展望

本次边坡治理以工程措施为主,后续可结合边坡实际情况,引入边坡位移、渗流压力、裂缝开展等自动化在线监测系统,实现全天候、实时化、智能化安全预警,进一步提升电站运行安全水平。同时,可继续优化施工工艺,推广高性能抗冻混凝土、新型锚杆与快速支护技术,提高施工效率与工程耐久性,为抽水蓄能电站高质量建设提供更强技术支撑。

[参考文献]

[1]史力诚,温家华,闫宾,等.对抽水蓄能电站安全监测实践的思考[J].水电与抽水蓄能,2026,12(2):41-46.

[2]刘履程.抽水蓄能电站水位骤降工况下边坡稳定分析[J].应用能源技术,2026,(2):57-59.

[3]肖洪.抽水蓄能电站高边坡系统化开挖与高性能混凝土支护技术研究[J].水泥,2025,(11):106-108.

作者简介:韩贞强(1989年9月18日),男,汉族,籍贯(河南省周口市淮阳县),职称:中级,学历:本科,毕业学院:华北水利水电大学;专业:工程管理,研究方向:抽水蓄能电站边坡综合治理与排水优化施工技术/抽水蓄能电站尾水隧洞闸门井固卷机应急操作装置支架加固技术研究/现从事工作:施工管理。