

水电站厂房开挖支护中的技术要点与施工控制

段 涛 李沐泽

中国电建集团国际工程有限公司 北京 100037

【摘 要】：水电站机组厂房工程多处于紧邻建筑区域，且厂房基坑与尾水渠边坡开挖支护面临地质条件复杂、周边建筑保护要求高、施工空间受限等多重约束，对水电站厂房开挖支护施工提出了极高的要求和标准。本文结合工程实例，系统分析水电站厂房开挖中的相关技术要点，通过强化对分层分台阶开挖、控制爆破减震、锚杆+钢筋网喷混凝土联合支护、边坡排水等环节技术要点的管理控制，能够切实保证工程质量的合格、达标和施工安全。

【关键词】：水电站厂房；开挖支护；控制爆破；喷锚支护；施工控制

DOI:10.12417/2811-0536.26.09.038

引言

水电站厂房是水电工程的核心枢纽建筑，其基坑与边坡开挖支护的施工质量直接决定厂房主体结构的长期运行安全。受水电工程选址特点影响，厂房多布置在河道沿岸狭窄区域，普遍存在施工空间受限、周边已建建筑保护要求高、边坡地质条件复杂等问题，常规开挖支护工艺难以兼顾施工效率、结构安全与周边环境防护要求。本文结合工程实例，对水电站厂房开挖支护的核心技术要点与全流程施工控制策略进行了分析研究，以供参考。

1 工程概况

1.1 项目基本参数

某电站主厂房整体尺寸为 27.6m×19.75m×37.35m（长×宽×高），内部安装一台 15MW 水轮发电机组，机组安装高程 618.00m。安装间布置在主厂房左端头，副厂房平行设置在主厂房上、下游侧，整体建筑布局紧凑，施工区域与已建左右岸建筑物紧邻，施工空间受限明显。本项目施工内容包含厂房基坑开挖、尾水渠边坡开挖及对应支护工程，厂房土石方开挖总量 18000m³，边坡设计坡度为 1:0.1，支护方式根据现场地质条件动态调整。项目前期已完成同类岩石爆破试验，通过现场爆破参数优化与振动数据采集，确定适配本项目地质条件的最优爆破参数，为后续开挖施工提供数据支撑。

1.2 支护设计方案

本项目边坡支护采用全注浆锚杆+钢筋网+喷射混凝土的联合支护体系，根据边坡高程分为 A 型、B 型两类支护型式，核心支护参数如下表所示。

表 1 边坡支护设计参数表

支护类型	支护范围	核心支护参数
------	------	--------

B 型	EL609.95 以上边坡	1.φ25 螺纹钢锚杆，L=4.5m， @3m×3m 梅花形布置，外露 10cm； 2.φ6@200×200mm 钢筋网，C20 喷射混凝土，厚度 10cm
A 型	EL609.95 基础区域	基础灌浆@2m×2m，灌浆深度 5m

2 水电站厂房开挖支护核心技术要点

2.1 分层分台阶开挖技术

厂房基坑与边坡开挖严格遵循从上到下、分层分段、先支护后开挖的核心原则，采用分层分台阶的开挖方式，根据边坡高度与地质条件合理划分分层厚度。第一层、第二层开挖厚度控制为 1m，从第三层开始向下每层开挖厚度调整为 2m，每层开挖完成后及时完成对应边坡的支护施工，待支护结构达到设计强度后，再开展下一层的开挖作业，避免边坡长时间裸露出现失稳风险^[2]。开挖作业以机械开挖为主，主要采用反铲、装载机配合自卸车完成土石方开挖与运输，对于机械无法到达的狭窄区域，采用人工配合小型机具清理。对于靠近现有建筑物的岩体开挖，严禁采用爆破方式，使用液压锤和静态破碎剂完成岩体破碎与挖掘，避免爆破振动对周边已建建筑造成损伤。开挖过程中严格控制边坡坡比，每层开挖完成后及时复核边坡尺寸，确保边坡成型精度符合设计要求，避免出现超挖、欠挖问题。

2.2 控制爆破减震技术

本项目厂房开挖区域紧邻已建建筑物，爆破施工的核心控制要点为减震防护，避免爆破振动对周边建筑结构造成损伤。项目前期已完成同类岩石爆破试验，根据试验成果优化形成毫秒微差台阶爆破技术，核心技术要点如下：

（1）减震孔前置防护：基坑开挖前，沿基坑外侧

使用 100B 潜孔钻施工一圈减震孔,孔距控制为 40cm,削弱爆破振动向周边区域的传播,形成第一道减震防护屏障。

(2) 分层控制爆破参数: 第一层、第二层开挖区域靠近现有结构,每轮钻孔深度设定为 1.2m,实际推进深度 1m,减小单次爆破规模,降低振动强度;从第三层开始向下,每轮钻孔深度调整为 2.2m,采用分台阶梯式爆破法,提升开挖效率。

(3) 毫秒微差起爆方式: 采用 YT-28 凿岩机钻孔,孔径 42mm,使用 29mm 直径乳化炸药,火雷管配合毫秒微差起爆网络,通过分段起爆减小单次爆破的炸药用量,降低爆破振动峰值^[3]。

(4) 爆破参数动态优化: 正式爆破前,在远离现有建筑物的选定区域开展三次试爆作业,采集爆破振动监测数据,根据监测结果优化调整孔距、排距、单耗等爆破参数,确保爆破振动符合现有建筑物的安全要求。

2.3 锚杆+钢筋网喷混凝土联合支护技术

本项目边坡支护采用全注浆锚杆+钢筋网+喷射混凝土的联合支护体系,三者协同作用形成完整的边坡受力结构,保障边坡的长期稳定。

(1) 全注浆锚杆施工: 锚杆采用 $\phi 25$ 螺纹钢制作,设计长度 4.5m,按 3m $\times$ 3m 梅花形布置,采用“先灌浆,后插杆”的施工工艺。施工流程为: 岩面清理 $\rightarrow$ 测量放线布孔 $\rightarrow$ 钻孔 $\rightarrow$ 清孔 $\rightarrow$ 浆液搅拌灌浆 $\rightarrow$ 锚杆安装 $\rightarrow$ 二次灌浆封堵 $\rightarrow$ 抗拔性能试验^[4]。钻孔采用手动气钻、100B 潜孔钻或液压钻,孔位允许偏差 100mm,孔深允许偏差 50mm,孔轴线与设计轴线偏差不大于 3%。清孔完成后,按实验室配合比配置水泥砂浆,注浆完成后快速插入锚杆,确保锚杆外露长度不小于 100mm,待浆液完全固化后安装锚固底板与螺母。锚杆施工完成后,按 5% 的比例开展拉拔试验,确保锚杆最大拉拔载荷不低于 10 吨,不合格锚杆需返工处理,如图 1 所示为锚杆支护结构的形式。

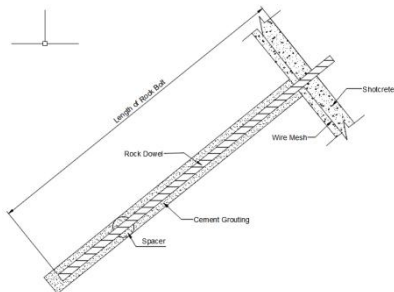


图 1 厂房开挖锚杆支护结构示意图

钢筋网与喷射混凝土施工: 喷射混凝土采用 C20 强度等级,设计厚度 10cm,配合比由实验室试验确定,每立方米喷射混凝土的材料掺量如下表所示。施工流程为: 坡面清理 $\rightarrow$ 钢筋网安装 $\rightarrow$ 喷射混凝土施工 $\rightarrow$ 养护。钢筋网采用 $\phi 6$ 钢筋制作,网片尺寸 200 $\times$ 200mm,平铺在坡面上焊接或绑扎牢固,每隔 3m 设置一个垫块,确保钢筋网的保护层厚度符合要求。喷射混凝土采用湿喷工艺,施工过程中严格控制喷射厚度,确保面层平整、密实,无空鼓、开裂问题。喷射混凝土终凝 2 小时后,开展喷水养护,养护时长不少于 7 天,当周边空气湿度达到或超过 85% 时,可采用自然养护方式。

2.4 边坡排水系统配套技术

边坡排水是保障边坡稳定的关键环节,本项目边坡设置排水孔系统,降低边坡内部的地下水压力,避免地下水侵蚀边坡岩体导致失稳。排水孔施工可与锚杆钻孔同步开展,采用空气钻孔机、100B 钻机或液压钻机施工,施工流程为: 测量定位 $\rightarrow$ 钻孔 $\rightarrow$ 清孔 $\rightarrow$ PVC 排水管安装。测量员按设计图纸确定排水孔位置,用红漆清晰标记,孔位偏差不大于 10cm,孔深误差不大于 5cm,孔方向偏差不大于 5 $^{\circ}$ 。钻孔完成后,用高压空气和水清洗孔内,确保孔内无堵塞,随后安装包裹土工布的 PVC 排水管,喷混凝土施工前做好管口防护,避免混凝土堵塞排水孔。排水孔施工也可在喷射混凝土施工完成后进行,确保边坡内部地下水可顺利排出,降低边坡岩体的水毁风险。

3 厂房开挖支护全流程施工控制要点

3.1 施工准备阶段管控

施工准备为开挖支护有序推进奠定基础,项目从五大维度落实标准化管控。技术层面,技术人员结合图纸编制全套施工方案,组织全员分层技术交底;试验室提前完成支护混凝土、砂浆配比试验,未出具合格配比报告的材料不得进场。物资设备层面,锚杆、钢筋、火工品等进场须附带合格证明,不合格物资直接清场;反铲、凿岩机、注浆及喷射设备提前检修,250kW 发电机、23m³/min 空压机等核心机组提前调试,保障施工动力稳定。人员管理层面,清晰划分各岗位权责,所有人员完成岗前安全培训,爆破、焊接特种作业人员持有效证件上岗^[5]。现场统筹层面,接驳既有道路形成运输通道,施工用水经沉淀过滤存入水箱,电力依靠柴油发电机供给;开挖面布设集水坑持续抽排积水,弃渣统一转运至指定弃土场,杜绝乱堆扬尘。

3.2 开挖施工过程动态控制

开挖全程执行动态巡查机制,四大环节同步管控。开挖工序遵循自上而下、分层分段、先支护后下挖准则,单层支护强度达标后方可继续施工;临近既有建筑区段放弃爆破,采用液压锤配合人工浅挖,降低振动扰动。边坡成型依靠测量实时校核坡比、高程,超欠挖部位及时修整,禁止虚土回填;作业期间专人观测坡面裂缝、剥落迹象,出现失稳征兆立刻停工撤离,落实加固措施。周边防护方面,爆破区域提前开挖减震沟、搭设防护屏障,全程监测建筑振动与沉降,数值超标即刻调整爆破参数;建筑周边限制重型机械长时间作业。渣土运输车辆密闭加盖,沿路定时洒水抑尘,弃渣全部定点堆放,运输道路常态化养护,维护通行条件。

3.3 支护施工工序质量控制

支护执行工序报验制度,上道工序验收通过才可开展后续施工。锚杆施工重点把控六项指标:钻孔完工复核孔径、孔深、倾角,高压水气联合清孔清除孔内岩粉;浆液现场称重拌合,初凝前用完,注浆保证杆体完全包裹;锚杆安装完成核验外露长度与垫板,抽样开展抗拔检测,不合格锚杆整体返工。钢筋网与喷护作业严控骨架规格、网片贴合度,垫块保障混凝土保护层达标;喷射作业稳定压力与喷射角度,避免空鼓开裂,面层终凝后按期养护,养护阶段禁止坡面重载作业。排水孔按设计定位、定深钻孔,彻底清堵,排水管外侧包裹土工布,管口做好防护,长期维持坡面排水通畅。

4 水电站厂房开挖支护施工中的安全管控措施

项目建立以项目经理为第一责任人的安全生产管理体系,明确各岗位的安全生产职责,制定完善的安全生产管理制度,实行全员安全生产责任制,所有作业人员必须签订安全生产责任书,落实安全生产责任。

一是强化安全教育培训。所有进场作业人员必须开展三级安全教育培训,考核合格后方可上岗;特种作业人员必须持证上岗,定期开展复审培训;爆破、高处作业、动火作业等危险作业前,必须开展专项安全技术交底,明确作业风险与安全防护措施,交底双方签字确认。

二是做好施工现场安全防护。施工区域设置封闭围挡,严禁无关人员进入;基坑周边、边坡顶部设置防护栏杆,高度不低于1.2m,设置挡脚板,涂刷警示标志;高处作业人员必须佩戴安全带,安全带遵循高挂低用的原则,作业平台搭设牢固,设置防护栏杆;爆破作业区域设置警戒带、警示标志,爆破前清场警戒,严禁无关人员进入警戒区域;施工用电严格执行三级配电、两级保护制度,所有电气设备必须接地接零保护,严禁私拉乱接;机械设备定期检修保养,严禁带病运行,操作人员必须持证上岗,严格按操作规程作业。

三是加强危险作业管控。爆破、高处作业、动火作业、有限空间作业等危险作业,必须实行作业票制度,作业前办理作业许可证,明确作业时间、地点、作业人员、安全防护措施、应急处置方案,经审批同意后方可开展作业,作业过程中安排专人现场监护,严禁无票作业、超范围作业。

5 结语

本项目的实施经验表明,水电站厂房开挖支护工程的核心在于技术与管控的深度融合,必须结合项目的地质条件、周边环境、施工约束,针对性优化施工技术方案,同时建立全流程、全维度的施工管控体系,严格落实各项技术要求与管控标准,才能保障工程的施工质量与安全。本文总结的技术要点与施工控制标准,可为同类水电站厂房狭小场地、高保护要求的开挖支护工程提供可落地的实操参考,推动水电工程厂房开挖支护施工的标准化、规范化发展。

参考文献:

- [1] 张鹏,王欣,何建华,等.叶巴滩水电站地下厂房开挖支护设计研究[J].四川水力发电,2025,44(5):110-115+130.
- [2] 王军,梁岩,张楚.早强砂浆预应力锚杆在水电站地下厂房围岩支护中的应用[J].云南水力发电,2024,40(9):93-96.
- [3] 张慧昌.地质条件复杂区水电站厂房施工方法[J].河南水利与南水北调,2021,50(10):16-18.
- [4] 张林,唐进东,任明海.佳蒂格德水电站厂房竖井开挖与支护技术[J].四川水力发电,2021,40(5):14-17+27.
- [5] 补约依呷,陈鹏,方丹,等.白鹤滩水电站左岸地下厂房大跨度顶拱开挖支护技术分析[J].四川水力发电,2020,39(3):88-93.