水利水电工程中高边坡开挖及锚喷支护的应用

冯琰璋
中国水利水电第十一工程局有限公司　河南　郑州　450000

摘　要：水利水电工程高边坡施工地质条件复杂、地应力较高、安全风险突出，极易出现滑移、崩塌等失稳病害，严重影响工程施工安全与建设质量。本文依托高边坡施工核心理论，系统阐述分层开挖、控制爆破、锚喷支护的技术机理与标准化施工流程，针对软弱围岩、恶劣天气等特殊工况制定优化措施，建立完善的质量控制、安全防控与动态监测体系，梳理施工常见问题并提出整改方案，可为同类水利边坡工程施工提供可靠技术借鉴。

关键词：水利水电工程；高边坡开挖；锚喷支护；应用

引言：当前我国水利水电工程建设不断推进，多数项目地处山区复杂地貌，高边坡开挖支护成为施工关键环节。高边坡受水文地质、岩体结构、施工扰动等多重因素耦合作用，稳定性控制难度极大，传统施工方式易引发边坡变形、坍塌等安全事故。锚喷支护凭借优良的加固效果与适配性，成为高边坡防护的核心技术。为此，本文深入研究高边坡开挖与锚喷支护施工工艺及管控要点，有效提升边坡施工安全与整体稳定性。

1 水利水电高边坡施工核心理论与技术特性

1.1 高边坡工程基本概述

（1）水利水电高边坡通常指天然或人工开挖形成的坡高大于30m、岩体结构复杂的高陡斜坡，具有高度大、地应力高、地质条件复杂、工期紧、安全风险高等显著工程特点。（2）高边坡稳定性主要受地质构造与岩体结构面特征、水文地质条件（渗流场与孔隙水压力）、施工扰动（爆破震动与开挖卸荷）三大因素耦合控制。（3）常见变形破坏类型包括平面滑动、楔形体滑动、圆弧滑动、倾倒破坏及崩塌，其机理本质为坡体内剪应力超过抗剪强度或拉应力超过抗拉强度，导致岩体沿软弱结构面发生失稳。

1.2 高边坡开挖施工技术原理

（1）分层分级开挖遵循自上而下、由外及内的顺序，每层开挖高度一般控制在5～10m，预留保护层以减小爆破扰动，实现逐级卸荷、逐级支护。（2）开挖卸荷导致坡面法向应力降低、剪应力集中，围岩稳定控制的核心在于控制卸荷速率与爆破震动强度，通过预裂爆破、光面爆破技术减小对保留岩体的损伤。（3）开挖施工使坡体应力场重新分布，若未及时支护，坡面位移持续增长、塑性区扩展贯通，最终导致整体稳定性降低甚至失稳[1]。

1.3 锚喷支护技术作用机理

（1）锚杆通过锚固段与岩体粘结，将不稳定块体悬吊于深层稳定岩体，同时通过系统锚杆提高岩体整体性，发挥“悬吊—组合—拱圈”三重加固效应。（2）喷射混凝土封闭坡面，隔绝大气降水入渗，减小岩体强度劣化；同时与岩面紧密贴合，利用自身抗拉强度改善坡面应力状态，发挥护面与防渗作用。（3）锚喷联合支护中，锚杆深入岩体提供深层锚固力，喷射混凝土覆盖坡面提供表层约束力，二者协同作用形成“深层锚固+表层约束”的立体加固体系。

2 水利水电工程中高边坡开挖及锚喷支护施工工艺与实施要点

2.1 高边坡开挖施工工艺

（1）施工前期准备与测量放样工作：开工前完成设计交底与地质复核，布设坡顶截水沟及排水系统；采用全站仪或GNSS进行精确放样，标定开口线、马道位置及每级开挖边线，设置沉降位移观测桩，建立初始监测基准数据。（2）分层分段开挖流程与参数控制：严格遵循自上而下、分级开挖的顺序，每层高度按5～10m控制，分段长度宜取15～20m；每级开挖面预留1.5～2.0m保护层，待下一级支护完成后再行开挖，确保边坡逐级卸荷、逐级稳定。（3）爆破施工控制与边坡修坡处理工艺：靠近设计坡面采用预裂爆破或光面爆破，孔距取0.4～0.6m、线装药密度控制在150～250g/m，半孔率不低于85%；爆破后采用人工配合机械进行修坡，清除危石、欠挖及松动岩块，坡面平整度满足15cm/2m要求。（4）开挖渣料转运与现场文明施工管控：渣料按有用料与弃料分类堆放，有用料运至指定堆料场，弃料运至渣场并分层碾压；运输车辆加盖防洒落，施工道路定时洒水降尘，坡脚设置临时挡护设施，严禁渣料下河或堆占行洪通道[2]。

2.2 锚喷支护标准化施工流程

（1）坡面清理与基层处理施工要点：清除坡面浮

石、松散岩块及杂物，对岩面凹陷处用喷射混凝土找平，冲洗坡面岩粉，确保基层洁净、湿润，为锚喷提供可靠粘结基面。（2）锚杆钻孔、安装与注浆施工工艺：钻孔采用潜孔钻或锚杆钻机，孔径比锚杆直径大15～20mm，孔深偏差不超过±50mm；安装锚杆前清孔吹净岩粉，注浆采用孔底返浆法，注浆压力0.2～0.5MPa，水泥砂浆强度不低于M20，注浆饱满度不小于90%。（3）钢筋网铺设与固定施工规范：钢筋网在坡面搭接长度不小于一个网格边长（一般≥20cm），与锚杆端部及垫板焊接或绑扎牢固，网片距坡面保持3～5cm保护层，网格节点采用点焊或双股铁丝绑扎，确保整体刚度[3]。（4）分层喷射混凝土施工与养护工艺：分两层喷射，首层厚3～5cm封闭坡面，终凝后喷射第二层至设计厚度（一般8～15cm）；喷射作业自下而上分段进行，风压0.3～0.5MPa、水灰比0.4～0.5；终凝后喷雾养护不少于7天，防止干缩开裂。

2.3 特殊工况施工优化措施

（1）软弱破碎地质边坡施工优化方案：采用“浅开挖、强支护、短进尺”策略，每层开挖高度压缩至3～5m，增设超前锚杆或自进式管棚预加固；注浆改用早强水泥浆并掺入微膨胀剂，喷射混凝土添加钢纤维或聚丙烯纤维增强抗裂性能。（2）雨季、高温等恶劣天气施工防控措施：雨季配备足够防雨布，对新喷射混凝土面及开挖面及时覆盖，坡顶及各级马道增设临时截排水沟，遇暴雨暂停作业；高温时段选择早晚施工，喷射混凝土骨料预冷或加水降温，缩短运输与喷射间隔时间。（3）高陡边坡高空作业安全施工要点：作业人员佩戴双钩安全带并设置安全母绳，施工平台采用双排钢管架或吊篮，经专项验收后方可使用；坡面设安全网及防护栏杆，下方划定警戒区，严禁上下立体交叉作业，安排专职安全员全程监护。

2.4 开挖与支护协同施工管控

（1）分层开挖、随挖随支施工节奏控制：每层开挖完成后，48小时内完成锚喷支护施工，控制坡面暴露时间；以开挖进度为牵引，支护紧跟其后，形成“开挖一层、支护一层、监测一层”的流水作业节奏。（2）临时支护与永久支护衔接施工工艺：软弱地质段先施作锚杆挂网喷混凝土作为临时支护，后续在永久衬砌或锚索施工时保留临时锚喷结构并纳入永久受力体系，实现临时支护与永久支护有机结合，避免重复施工。（3）多工序交叉施工协调管理措施：编制日循环作业计划，错峰安排爆破、注浆、喷射及监测作业时段；建立现场调度例会制度，明确各工序交接验收标准，配备备用设备及材料，确保工序衔接顺畅、连续均衡施工。

3 水利水电工程中高边坡开挖及锚喷支护施工质量控制、安全保障与工程应用效果

3.1 关键施工质量控制标准与措施

（1）边坡开挖尺寸、坡度、平整度质量管控要点：开挖前采用全站仪或GNSS精密放样，标定开口线、马道高程及坡脚位置，每级开挖完成后进行复核验收，开口线偏差控制在±10cm内，马道宽度误差不超过±20cm；坡面平整度采用2m靠尺检测，空隙不大于15cm，坡比偏差不超过设计值的±2%；对欠挖部位用风镐配合人工修整至设计线，超挖部分采用同标号混凝土或喷射混凝土回填密实，严禁虚土回填。（2）锚杆锚固力、注浆饱满度质量检测控制：锚杆抗拔力检测按每300根锚杆取一组（每组不少于3根）进行拉拔试验，抗拔力实测值不低于设计值的90%方为合格，不合格锚杆应在相邻位置补打并重新检测；注浆饱满度采用声波透射法或预埋注浆管检查，饱满度不得低于90%，检测发现不饱满时，采用高压补浆机进行二次补注水泥浆，确保锚杆全段包裹密实[4]。（3）喷射混凝土厚度、强度及外观质量控制：厚度检测每20m坡长布设一组检查孔（不少于3个），平均厚度不小于设计厚度值，最小厚度不低于设计值的85%；强度检测采用钻芯取样法，每100m²取一组试件，28d抗压强度不低于设计标号；外观质量要求表面平顺、无干缩裂缝、无流坠淌淌痕迹，搭接部位平缓过渡，喷层与基岩黏结紧密，锤击检查无空响。

3.2 施工安全风险防控体系

（1）高边坡坍塌、落石等核心风险识别：系统梳理顺层滑移、楔形体崩塌、坡面松动块体坠落、爆破震动诱发滑坡及雨水软化导致局部失稳等主要风险类型，按影响程度划分为红、橙、黄三级风险区段，红色区段实行专项安全论证并制定独立防控方案，建立风险动态更新台账。（2）施工全过程安全防护技术措施：坡顶边缘设置1.2m高钢管防护栏杆并布设安全警示标牌，各级马道内侧设置被动柔性防护网拦截滚石；主动防护网紧贴坡面覆盖松动岩体，与锚杆端部可靠连接；爆破作业严格执行“预警—警戒—起爆—检查”四步程序，爆破后立即进行敲帮问顶作业，人工清除坡面危石及悬浮块体；高空作业人员佩戴双钩安全带，作业平台搭设必须经专项验收并挂牌使用。（3）现场安全巡查与应急处置方案：每班次开工前由专职安全员对坡顶裂缝、坡面变形、排水沟畅通情况及支护结构状态进行全面巡查并记录台账，发现异常立即停工撤人；制定坍塌、落石伤害、高处坠落三类专项应急预案，明确应急响应流程、

人员分工及物资储备点；每季度组织一次实战演练，确保全员掌握避险路线和急救技能[5]。

3.3 边坡监测与支护效果评估

（1）边坡位移、沉降及应力监测方案：沿边坡高度方向每10～15m布设一个监测断面，每个断面设置表面位移监测点（采用GNSS自动监测或全站仪人工观测）、深部测斜孔（孔深进入稳定基岩不少于5m）以及锚杆应力计；施工高峰期加密至每日1～2次监测频率，暴雨或变形加速等特殊时段实行连续实时监测；监测数据实时上传至信息化管理平台，出现异常速率时自动预警并通知现场负责人。（2）支护结构服役状态定期检测方法：锚喷支护完工后每半年开展一次系统性检查，内容包括锚索测力计读数复核、喷射混凝土表面开裂剥落检查、钢筋网外露锈蚀情况检查，以及马道排水沟堵塞和坡面渗水点变化观察，所有检查结果录入运维档案，发现缺陷及时修补处理。（3）施工完成后边坡稳定性综合评估：综合监测数据（位移、应力、渗压）与设计预测值进行对比分析，当坡面位移速率连续三个月小于0.5mm/月、锚杆应力趋于收敛稳定且无明显渗水异常时，可判定边坡进入安全运行状态；由第三方专业机构出具包含安全等级评定、潜在风险提示及长期运维建议在内的综合评估报告。

3.4 工程应用问题与优化对策

（1）现场施工常见质量与技术问题分析：坡面超欠挖控制不均导致部分区域喷射混凝土厚度不足或超厚浪费材料；锚杆注浆不密实造成锚固力低于设计值，尤其在下倾孔中气体残留问题突出；喷射混凝土回弹率普遍偏高（超过30%），作业环境粉尘大影响施工健康；雨季期间坡面冲刷导致新喷混凝土脱落及排水沟堵塞。（2）针对各类问题的技术优化与整改措施：优化爆破参数及起爆网络，采用加密孔距、减小单孔药量方式控制超欠挖，坡面欠挖部位采用机械铣削精修；注浆推行“孔底返浆+二次高压补浆”组合工艺，并在浆液中掺入微膨胀剂提高饱满度；调整喷射机工作风压至0.4～0.5MPa、喷嘴与受喷面保持0.8～1.2m垂直距离，掺加速凝剂将回弹率控制在20%以内；雨季对新鲜喷射混凝土面覆盖防水布防冲刷，每级马道内侧增设临时截水沟。（3）后续同类工程施工技术改进建议：推广应用BIM+数字化施工管理平台，实现开挖线、支护参数三维可视化交底和施工过程精准模拟；引入智能注浆记录仪自动采集流量与压力数据，采用喷射混凝土机械手降低人工操作误差和健康风险；建立基于物联网的边坡安全实时预警系统，集成位移、应力、雨量多源数据实现风险自动识别与分级预警，推动高边坡施工从“经验驱动”向“数据驱动”转变，全面提升施工质量与安全保障水平。

结束语

本文全面分析水利水电工程高边坡开挖及锚喷支护的技术原理、施工工艺、质量安全管控措施，总结特殊工况施工优化策略与现场常见技术难题，形成完整的高边坡施工技术体系。科学落实分层开挖、随挖随支、动态监测等施工举措，可有效规避边坡失稳风险，保障工程施工质量。未来结合智能化、数字化施工技术迭代升级，能够进一步提升水利高边坡工程的施工精细化与安全标准化水平。

参考文献

[1]张冲,刘小强,胡璇.叶巴滩水电站右岸坝肩高边坡变形机制分析与加固治理[J].岩土工程学报,2025,47(03):477-486.

[2]王樱畯,赵琳,雷显阳.抽水蓄能电站高沥青混凝土面板堆石坝边坡支护技术研究[J].人民长江,2022,53(01):148-153.

[3]杨敏,周小军,高营.水电站进水口陡倾角超高边坡开挖支护施工技术[J].云南水力发电,2023,39(12):142-145.

[4]曹钢进,黄志华.水利水电工程中高边坡开挖支护施工技术[J].珠江水运,2023,14(07):98-101.

[5]肖洪.抽水蓄能电站高边坡系统化开挖与高性能锚喷支护技术研究[J].水泥,2025,20(11):106-108.