

# 水利水电工程中边坡开挖支护技术及其应用策略研究

徐志鹏

六盘水市盘州市盘关镇农业农村综合服务中心水务组 贵州 六盘水 553000

**摘要：**水利水电工程中，边坡开挖支护技术至关重要。本文介绍了边坡开挖支护技术体系，包括技术分类、原理及关键要素。分析了地质条件复杂、施工动态风险、材料设备性能要求等应用关键问题，并提出前期勘测优化、施工精细化控制、风险应急等策略。展望了智能化技术应用、绿色支护理念、多学科交叉融合等技术发展趋势。

**关键词：**边坡开挖支护；技术体系；应用策略；智能化技术；绿色支护

**引言：**水利水电工程建设中，边坡开挖支护是保障工程安全的关键环节。边坡地质条件复杂多变，开挖易引发失稳等问题，影响工程进度与质量。合理运用开挖支护技术，能有效增强边坡稳定性。深入研究相关技术及其应用策略，对提高水利水电工程建设水平、保障工程长期安全运行具有重要意义。

## 1 边坡开挖支护技术体系

### 1.1 技术分类与原理

浅层支护技术包括锚杆支护喷射混凝土土钉墙等，通过对边坡表层土体进行加固或浅层锚固，增强表层土体整体性，抑制表层溜塌或浅层滑动，利用结构与土体间的摩擦力和粘结力，将局部应力分散传递至稳定地层，形成表层防护屏障<sup>[1]</sup>。深层支护技术针对边坡内部深层滑动面或软弱夹层，抗滑桩依靠自身刚度插入稳定地层，阻挡深层土体位移，预应力锚索通过张拉产生的轴向力，将深层不稳定土体与稳定岩层连接，限制深层变形，深层搅拌桩则通过固化剂与土体混合形成柱状固结体，提升深层土体强度。综合支护技术融合浅层与深层技术优势，搭配排水系统和植被防护，构建多层次防护体系，浅层技术处理表层问题，深层技术控制深层隐患，排水系统减少水对土体的侵蚀，植被防护借助根系进一步稳固表层土壤，形成协同作用的防护网络。

### 1.2 关键技术要素

锚固系统中，锚杆与锚索的选型需匹配边坡岩土体性质，硬质岩层中宜采用高强度锚杆，软质土层中需考虑锚索的柔性适应能力。布置角度需结合边坡倾角与潜在滑动面走向，倾斜角度过大则可能增加对周边土体的扰动。深度需穿透潜在滑动面，确保锚固端进入稳定地层，形成可靠的力传递路径。喷射混凝土工艺中，材料配比需根据边坡环境调整，干燥环境下注重强度提升，潮湿环境下需增强抗渗性。喷射厚度需根据表层土体松散程度确定，松散土

层需增加厚度以提升整体性，坚硬岩层可适当减薄。层间结合需通过表面处理实现，前一层混凝土终凝前进行拉毛处理，使后续喷射层与前层紧密粘结，避免分层脱落。排水设计中，排水孔布置需沿边坡坡体走向与倾向形成网格状，确保各区域积水均能通过排水孔排出，孔眼方向需朝向坡脚，利用重力加速排水。盲沟设置在边坡坡脚或潜在滑动面附近，采用透水性材料填充，将土体中的渗水汇集后导出，通过降低孔隙水压力减少对边坡稳定性的不利影响。锚固系统施工前需检查岩土体完整性，存在裂隙时需预先填充处理，避免锚固力因局部空洞而衰减。喷射混凝土前需清理坡面浮土与松动岩块，保证基层洁净度以增强与混凝土的粘结效果。

## 2 边坡开挖支护技术应用的关键问题

### 2.1 地质条件复杂性挑战

软土具有高压缩性和低抗剪强度，在开挖过程中易发生塑性流动，导致边坡坡脚失稳，断层带处岩土体完整性被破坏，形成软弱结构面，可能成为潜在滑动通道，高含水量地层中水分填充孔隙，降低土体颗粒间摩擦力，削弱边坡整体稳定性<sup>[2]</sup>。岩土水理性质中透水性决定水分渗透速度与范围，透水性强的地层易受雨水或地下水渗透影响，引发土体自重增加和强度衰减，保水性强的土体长期处于饱和状态，易因孔隙水压力升高而降低抗剪能力，直接制约支护结构受力状态，使支护效果难以达到预期。不同地质界面的过渡带往往存在力学性质突变，开挖时易出现应力集中，加剧边坡变形风险，风化岩层随时间推移强度逐渐降低，对支护结构的长期承载能力构成考验。

### 2.2 施工过程动态风险

开挖顺序与支护时序的协同控制需遵循先支护后开挖原则，上层支护结构未形成足够承载力前进行下层开挖，可能导致已开挖坡面失去约束而发生坍塌，需根据边坡高度分段分层推进，确保每一步开挖后及时跟进支

护。机械作业效率高但易出现开挖边界不规则，人工修整可弥补机械精度不足，需在两者间找到平衡，避免超挖造成额外支护负荷，或欠挖留存的松散土体成为安全隐患。临时支护需具备足够强度以应对施工期间的荷载变化，永久支护施工时需考虑与临时支护的结构衔接，通过节点处理使荷载平稳传递，防止过渡阶段出现应力集中。开挖过程中边坡内部应力不断重分布，需通过实时监测调整施工节奏，避免局部变形过大引发连锁反应，雨季施工时雨水入渗可能改变土体性质，需强化临时排水措施与支护强度。

### 2.3 材料与设备性能要求

锚杆需具备抗拔力和耐腐蚀性，适应不同岩土体的受力环境，混凝土需满足设计强度等级，在潮湿或侵蚀性环境中还需具备相应耐久性，钢筋作为骨架材料需与混凝土协同工作，确保整体结构受力均匀。钻机需根据岩土体硬度选择合适钻头，在软土中需控制钻进速度以防塌孔，在硬岩中需保证钻孔垂直度以确保锚杆安装精度。注浆设备需能稳定控制注浆压力和流量，使浆液充分填充锚杆与孔壁间隙，形成有效粘结。喷射机械需调节喷射角度和速度，使混凝土均匀覆盖坡面，保证喷射厚度符合设计要求，减少蜂窝或空洞现象。材料运输过程中需避免过度颠簸导致离析，存储时需采取防潮措施防止性能劣化，设备运行前需进行全面检查，确保各部件协调工作，减少因机械故障导致的施工中断。喷射混凝土所用骨料需经过筛分去除杂质，保证颗粒级配合理，以提升与基层的粘结力，注浆材料需根据岩土体孔隙特征调整稠度，确保在复杂地质条件下仍能有效扩散。

## 3 边坡开挖支护技术应用策略

### 3.1 前期勘测与方案设计优化

多维度地质勘查涵盖岩层走向断层位置地下水分布等内容，通过细致探测掌握边坡岩土体的空间分布特征，明确潜在的软弱夹层和地下水活动路径，为后续方案设计提供基础依据。借助钻探取样和物探手段，分析岩土体物理力学性质，判断不同深度地层的承载能力和变形特性<sup>[3]</sup>。支护方案的比选需综合考量经济性施工可行性长期稳定性，结合边坡所处环境与工程要求，分析不同方案在材料消耗施工周期和后期维护方面的差异，选择最适配的技术路径。对比不同锚固方式对边坡应力分布的影响，评估喷射混凝土与土钉墙组合方案的适用场景。动态设计理念要求根据开挖过程中暴露的实际地质条件，实时调整支护参数，当发现岩层走向与原勘测结果存在偏差时，及时修改锚杆布置角度，遇到地下水出露位置变化时，调整排水系统设置，使支护方案始终与

实际工况保持协调。在开挖面揭示出新的软弱夹层时，加密锚杆布置或增加锚索数量，确保支护强度与实际荷载相匹配。对勘测数据进行分层整理，绘制详细的地质剖面图，为方案调整提供直观参考。

### 3.2 施工过程精细化控制

开挖分层厚度与坡比的科学设定需基于岩土力学参数，坚硬岩层可适当增大分层厚度，软质土层则需减小厚度并放缓坡比，避免因开挖面暴露面积过大引发失稳。结合岩土体的内摩擦角和黏聚力，计算合理的开挖步距，防止坡体在自重作用下产生剪切破坏。支护施工工序标准化体现在钻孔清孔注浆插杆的闭环管理，钻孔需保证孔径与深度符合设计要求，清孔需清除孔内岩屑与积水，注浆需确保浆液充满孔腔，插杆需控制插入角度与深度，各环节紧密衔接形成完整的质量保障链条。注浆前检查孔道通畅性，插杆后复核位置偏差，确保每道工序符合技术标准。质量监测体系构建依赖变形监测应力监测渗流监测的协同，变形监测通过布设观测点追踪坡面位移变化，应力监测借助传感器感知支护结构受力状态，渗流监测记录地下水流动情况，三类监测数据相互印证，为施工调整提供准确参考。将监测结果实时传输至施工管理平台，通过分析数据变化趋势判断边坡稳定状态。施工人员需熟悉监测数据代表的含义，根据数据变化及时调整作业节奏。

### 3.3 风险应急与补救措施

边坡失稳预警指标包括位移速率裂缝扩展渗流量突变等，位移速率超过稳定阈值表明边坡内部应力调整剧烈，裂缝扩展方向与长度变化反映土体完整性破坏程度，渗流量突变可能预示地下水路径发生改变，需及时启动应急响应。定期巡查坡面发现新的裂缝时，标记其位置和宽度变化，持续观测发展态势。应急支护方案可采用临时锚索快速注浆表面封闭等方式，临时锚索通过快速张拉提供即时锚固力，快速注浆利用速凝材料填充裂隙阻止土体进一步变形，表面封闭采用喷射混凝土覆盖坡面防止雨水入渗加剧险情。临时锚索安装时优先选择靠近坡顶的位置，快速注浆过程中控制浆液凝固时间。长期维护策略涉及排水系统清理和支护结构加固，定期清理排水孔与盲沟内的淤积物，保证排水通畅，对出现锈蚀的锚杆进行防腐处理，对混凝土表面裂缝进行修补，通过持续维护延长支护体系的有效工作年限。每年雨季前检查排水系统功能，发现堵塞及时疏通，对支护结构表面进行全面检查，处理细微损伤防止病害扩大。维护记录需详细存档，为后续维护工作提供参考依据。

## 4 技术发展趋势与展望

### 4.1 智能化技术应用

无人机巡查可快速覆盖边坡全域，捕捉坡面裂缝位移等细微变化，三维激光扫描能构建高精度边坡模型，两者集成后实现从宏观监测到微观分析的无缝衔接，提升对边坡整体状态的感知能力<sup>[4]</sup>。物联网传感器网络布设于边坡不同深度和关键部位，实时采集岩土体应力变形及地下水动态数据，通过无线传输汇聚至数据平台，经算法分析转化为风险预警信号，为支护决策提供及时依据。智能化技术突破传统监测的时空限制，使边坡状态监控更具连续性和精准性，推动支护管理从被动应对向主动预防转变。智能算法对监测数据的深度挖掘，可识别边坡变形的潜在规律，提前预判可能出现的失稳迹象，为动态调整支护措施创造条件。无人机搭载的热成像设备还能探测坡面温度异常，辅助判断岩土体内部水分分布变化。

### 4.2 绿色支护理念

生态护坡技术中植被混凝土兼顾结构强度与生态相容性，为植物生长提供载体，土工格室通过网格约束土体并促进根系发育，两者推广应用可减少对自然环境的扰动，实现边坡防护与生态修复的协同。支护材料循环利用方面，可回收锚杆在服役期满后能完整取出并重新加工，再生混凝土将建筑废弃物经处理后作为骨料掺入新拌混凝土，降低对天然资源的依赖，减少废弃物堆放造成的环境负担。绿色支护理念注重支护功能与生态效益的平衡，使边坡工程更贴合可持续发展需求。植被根系与支护结构形成的复合体系，既能增强边坡稳定性，又能改善局部微气候，提升区域生态系统的自我调节能力。可降解材料在临时支护中的应用，能减少工程结束后的环境残留。

### 4.3 多学科交叉融合

岩土力学为支护结构设计提供力学分析基础，材料科学则致力于研发新型高强度支护材料，这类材料兼具抗腐蚀耐疲劳特性，能适应复杂地质环境，延长支护体系使用寿命。人工智能通过学习大量工程案例数据，构建支护方案优化模型，可根据地质条件自动生成多种方案并评估优劣，辅助简化决策流程。多学科交叉融合打破传统技术壁垒，将不同领域的理论方法与技术手段整合应用于边坡支护，催生更高效更经济的支护解决方案，推动整个技术领域向更高层次发展。信息科学的数据分析方法与岩土工程的实践经验相结合，可优化支护参数的选取，使设计方案更贴合工程实际需求，提升支护系统的综合效能。生物学研究成果引入生态护坡，能筛选出更适应边坡环境的植物品种，增强生态防护的持久性。

### 结束语

水利水电工程边坡开挖支护技术复杂且关键。面对地质条件挑战、施工动态风险等，需从前期勘测、施工控制、风险应急等多方面制定策略。随着技术发展，智能化、绿色化及多学科融合成为趋势。未来，应持续创新技术，提升边坡开挖支护水平，为水利水电工程安全稳定运行提供坚实保障。

### 参考文献

- [1]董晔,胡胜,涂小龙.边坡开挖支护技术在水利工程施工中的应用[J].中国科技纵横,2025(6):104-106.
- [2]秦凡,徐蓉.水利水电工程施工中边坡开挖支护技术研究[J].水电水利,2025,9(4):184-186.
- [3]李波.水利水电工程施工中边坡开挖支护技术的应用[J].电脑爱好者(普及版)(电子刊),2022(8):1659-1660.
- [4]姚瑶.水利水电施工过程中边坡开挖支护技术的应用[J].建筑与施工,2024,3(22):139-141.