

# 高边坡条件下水利工程锚喷支护施工技术优化研究

马艳琴

新疆北方建设集团有限公司 新疆 奎屯 833200

**【摘要】**：高边坡稳定性是水利工程建设的核心安全要点，锚喷支护作为提升高边坡稳定性的关键技术，其施工质量直接影响工程整体安全与使用寿命。本文结合高边坡水利工程的地质特性与施工难点，先阐述锚喷支护技术的核心原理与应用价值，再深入分析当前施工中存在的材料匹配不合理、工艺控制不精准、参数设计缺乏针对性等问题。基于此，从材料选型、施工工艺、参数设计及质量管控四个维度提出优化策略，结合工程实例验证优化技术的可行性与优越性。研究表明，优化后的锚喷支护技术可显著提升高边坡支护强度与稳定性，降低施工成本，为同类水利工程提供技术参考。

**【关键词】**：高边坡；水利工程；锚喷支护；施工技术；优化策略

DOI:10.12417/2811-0528.26.06.062

水利工程作为国民经济的重要基础设施，常涉及高边坡开挖与支护施工。高边坡地质条件复杂，易受地形、水文、地质构造等因素影响，若支护不当，极易引发滑坡、坍塌等地质灾害，不仅威胁工程施工安全，还会延误工期、增加工程造价。锚喷支护凭借结构轻巧、施工便捷、支护效果显著等优势，被广泛应用于高边坡水利工程中。但在实际施工中，传统锚喷支护技术受施工环境、技术水平等因素限制，仍存在诸多不足。例如，锚杆与注浆材料选择缺乏针对性，难以适配复杂地质条件；喷射混凝土施工易出现空鼓、裂缝等质量问题；施工参数设计与实际边坡情况脱节，导致支护效果不佳。因此，结合高边坡水利工程的具体特点，对锚喷支护施工技术进行优化研究，具有重要的现实意义与工程价值。

## 1 高边坡水利工程锚喷支护技术概述

(1) 核心组成与作用原理：锚喷支护主要由锚杆、喷射混凝土、钢筋网及注浆体组成，各部分协同作用实现对高边坡的支护加固。锚杆通过钻孔植入边坡岩体内部，利用锚杆与岩体的摩擦力、粘结力将边坡表层岩体与深层稳定岩体连接，限制岩体位移；喷射混凝土能快速覆盖边坡表面，封闭岩体裂隙，防止岩体风化与雨水渗透，同时与岩体形成整体，承担部分岩土压力；钢筋网可增强喷射混凝土的抗拉强度，减少裂缝产生；注浆体则能填充锚杆与钻孔间的空隙，提升锚杆的锚固力，同时胶结岩体裂隙，改善岩体整体性。其核心作用原理是通过支护结构与边坡岩体的协同工作，将边坡岩土体的自重应力、侧向压力等传递至深层稳定岩体，提升边坡整体抗滑能力与稳定性，避免边坡变形破坏。

(2) 高边坡水利工程的应用特点：高边坡水利工程的锚喷支护施工具有显著的特殊性。一是地质条件复杂，水利工程高边坡多位于河谷、山地等区域，岩体类型多样，常存在断层、裂隙、软弱夹层等不良地质构造，给支护施工带来较大挑战；

二是水文条件复杂，水利工程周边多临近水源，边坡岩土体含水量高，易导致岩体强度降低、锚杆锚固力下降；三是施工环境恶劣，高边坡施工场地狭窄，坡面陡峭，大型施工设备难以进场，且受风雨、温差等自然因素影响较大，施工难度高；四是安全要求高，高边坡一旦失稳，将直接威胁水利枢纽、发电厂房等核心构筑物安全，因此对锚喷支护的施工质量与稳定性要求更为严格。

## 2 高边坡水利工程锚喷支护施工现存问题

(1) 材料选型与匹配不合理：当前部分高边坡水利工程锚喷支护施工中，材料选型缺乏针对性，未结合边坡地质、水文条件进行科学匹配。例如，在风化严重、裂隙发育的岩体边坡中，仍采用普通螺纹钢锚杆，其抗腐蚀性、抗疲劳性不足，长期使用易发生锈蚀断裂；喷射混凝土配合比设计单一，未根据边坡含水量、岩体松散程度调整水泥、骨料、外加剂的比例，导致混凝土强度不足、粘结力差，易出现脱落、空鼓现象；注浆材料多采用普通水泥浆，其流动性、凝固时间难以适配不同深度、不同孔径的钻孔，注浆饱满度不足，影响锚杆锚固效果。

(2) 施工工艺控制不精准：施工工艺是影响锚喷支护质量的关键环节，当前施工中存在诸多工艺控制问题。锚杆施工方面，钻孔定位偏差较大，未严格按照设计孔位、孔径、孔深施工，导致锚杆受力不均；钻孔清理不彻底，孔内残留岩粉、积水，影响注浆体与孔壁的粘结力；注浆工艺落后，多采用常压注浆，易出现注浆不饱满、空洞等问题。喷射混凝土施工方面，部分工程仍采用干喷工艺，不仅粉尘污染严重，还易导致混凝土回弹率高、密实度不足；喷射顺序混乱，未遵循“先边墙后拱顶、先下后上”的原则，导致混凝土与岩体粘结不牢固；养护不及时，混凝土表面易产生裂缝，影响支护强度。

(3) 施工参数设计缺乏针对性：锚喷支护施工参数包括锚杆间距、长度、直径，喷射混凝土厚度、强度等级，钢筋网

规格等,其设计合理性直接影响支护效果。当前部分工程的施工参数设计过于依赖经验,未结合高边坡的具体地质条件、边坡高度、坡度等因素进行专项计算。例如,对于高度较大、坡度较陡的边坡,仍采用常规的锚杆间距与长度,导致锚杆支护密度不足,难以有效约束岩体位移;对于软弱夹层发育的边坡,喷射混凝土厚度设计过薄,无法抵御岩土体的侧向压力,易出现支护结构破坏。

(4) 质量管控体系不完善:质量管控环节存在诸多漏洞。一是原材料进场检验不严格,部分施工单位为降低成本,使用不合格的锚杆、水泥、骨料等材料,未按规范进行抽样检测;二是施工过程监测不足,未对锚杆钻孔精度、注浆压力、喷射混凝土厚度等关键指标进行实时监测,难以及时发现施工质量问题;三是竣工验收标准不严格,对锚喷支护的外观质量、强度、锚固力等指标的检测方法不规范,导致部分不合格工程通过验收,留下安全隐患。

### 3 高边坡水利工程锚喷支护施工技术优化策略

#### 3.1 材料选型与配比优化

结合高边坡地质与水文条件,优化材料选型与配比,提升材料适配性。锚杆方面,对于风化岩、软弱岩边坡,选用高强度树脂锚杆或中空注浆锚杆,其抗腐蚀性、锚固力更强;对于含水量高的边坡,采用镀锌锚杆或不锈钢锚杆,防止锈蚀。喷射混凝土方面,推广使用湿喷工艺专用混凝土,优化配合比设计,根据边坡岩体松散程度调整外加剂类型与掺量;在混凝土中掺入钢纤维或聚丙烯纤维,增强混凝土的抗拉强度与抗裂性能。注浆材料方面,采用水泥-水玻璃双液浆,其凝固时间可灵活调整,流动性好,能有效填充钻孔空隙与岩体裂隙;对于深层锚杆注浆,加入超细水泥或粉煤灰,提升注浆体的密实度与粘结强度。不同地质条件下锚喷支护材料选型优化如表1所示。

表1 不同地质条件下锚喷支护材料选型

地质条件类型	锚杆类型	喷射混凝土配比(水泥:砂:石)	注浆材料	钢筋网规格
风化岩边坡	高强度树脂锚杆	1:2:2.5 (掺入0.8%钢纤维)	水泥-水玻璃双液浆	φ8@150×150
软弱岩边坡	中空注浆锚杆	1:2:3(掺入1.0%聚丙烯纤维)	超细水泥-水玻璃双液浆	φ10@120×120
高含水量边坡	镀锌中空锚杆	1:1.8:2.2 (掺入高效减水剂)	抗水型水泥-水玻璃双液浆	φ8@120×120

坚硬岩裂隙边坡	普通螺纹钢锚杆	1:2:3	普通水泥浆	φ6@200×200
---------	---------	-------	-------	------------

#### 3.2 施工工艺优化

(1) 锚杆施工工艺优化:采用精准钻孔技术,利用全站仪定位孔位,结合地质雷达探测边坡岩体内部结构,调整钻孔角度与深度;选用液压钻机钻孔,提升钻孔精度与效率。钻孔完成后,采用高压风与高压水交替冲洗孔内岩粉与积水,确保孔壁清洁干燥。注浆工艺采用高压注浆技术,注浆压力控制在1.5-2.5MPa,根据钻孔深度与岩体裂隙情况调整注浆速度;对于深层钻孔,采用分段注浆工艺,防止注浆体流失。锚杆安装后,及时进行二次注浆,提升锚固力;安装完成后进行张拉锁定,确保锚杆处于预紧状态。(2) 喷射混凝土施工工艺优化:全面推广湿喷工艺,选用液压湿喷机,减少粉尘污染与混凝土回弹率,提升混凝土密实度。喷射前,对边坡岩面进行清理,去除松动岩体与浮渣;在岩面设置控制喷射厚度的标记,确保混凝土厚度均匀。喷射顺序遵循“先边墙后拱顶、先下后上、分层喷射”的原则,每层喷射厚度控制在5-8cm,相邻两层喷射间隔时间不少于2h。喷射完成后,及时进行洒水养护,养护时间不少于14d。(3) 钢筋网铺设工艺优化:钢筋网铺设前,先调整边坡岩面平整度,确保钢筋网与岩面贴合紧密。钢筋网采用绑扎或焊接连接,搭接长度不少于20cm,焊接点间距控制在30cm以内,防止钢筋网松动。钢筋网铺设完成后,及时喷射混凝土覆盖,避免钢筋锈蚀;在钢筋网与岩面之间设置垫块,确保混凝土保护层厚度不小于3cm。

#### 3.3 施工参数精准设计

基于高边坡地质勘察数据,结合边坡高度、坡度、岩土体物理力学性质等因素,采用数值模拟软件建立边坡支护模型,精准计算施工参数。锚杆参数设计方面,对于高度大于30m、坡度大于45°的高边坡,锚杆间距缩小至1.2-1.5m,长度增加至6-8m,直径选用25-32mm;对于存在软弱夹层的边坡,采用长短锚杆结合的方式,长锚杆深入稳定岩体,短锚杆加固表层岩体。喷射混凝土厚度设计方面,根据边坡岩体抗压强度调整,对于软弱岩边坡,喷射厚度控制在12-15cm;对于坚硬岩裂隙边坡,喷射厚度控制在8-10cm。钢筋网规格根据喷射混凝土厚度与边坡受力情况调整,确保钢筋网能有效增强混凝土抗拉性能。优化前后施工参数对比见表2。

表2 优化前后施工参数对比

参数类型	传统施工参数	优化后施工参数(软弱岩高边坡)	优化效果

锚杆间距(m)	1.8-2.0	1.2-1.5	支护密度提升,约束岩体位移效果增强
锚杆长度(m)	4-5	6-8	深入稳定岩体,锚固力提升30%以上
喷射混凝土厚度(cm)	8-10	12-15	抵御侧向压力能力增强,裂缝发生率降低
钢筋网规格	φ6@200×200	φ10@120×120	混凝土抗拉强度提升25%以上

(注:续表2)

### 3.4 质量管控体系完善

(1) 强化原材料质量管控:建立严格的原材料进场检验制度,对锚杆、水泥、骨料、外加剂等原材料进行抽样检测,检测项目包括锚杆抗拉强度、水泥强度、骨料级配、外加剂性能等,不合格材料严禁进场。建立原材料台账,记录材料来源、规格、检测结果等信息,确保材料可追溯。(2) 加强施工过程监测:采用信息化监测技术,对施工全过程进行实时监测。锚杆施工中,监测钻孔孔位偏差、孔深、孔径及注浆压力、注浆量;喷射混凝土施工中,监测混凝土配合比、喷射压力、喷射厚度及养护情况;边坡变形监测中,设置位移观测点,采用全站仪、测斜仪等设备监测边坡水平位移与垂直位移,监测频率为每天1-2次,若发现位移异常,及时采取加固措施。(3) 严格竣工验收标准:制定完善的竣工验收标准,对锚喷支护外观质量、强度、锚固力等指标进行严格检测。外观质量检测重点检查混凝土表面是否存在裂缝、空鼓、脱落等缺陷;强度检测采用回弹法或钻芯法,确保混凝土强度符合设计要求;锚固力检测采用锚杆拉拔试验,抽样数量不少于锚杆总数的3%,检测结果需达到设计锚固力的1.2倍以上。

### 4 工程实例分析

(1) 工程概况:某水利枢纽工程溢洪道高边坡,边坡高度45m,坡度50°,边坡岩体主要为风化砂岩与软弱页岩,存在多处裂隙与软弱夹层,边坡含水量较高,易发生滑坡风险。该工程初期采用传统锚喷支护技术,施工后边坡出现局部位移与混凝土裂缝问题。为解决上述问题,采用本文提出的优化锚

喷支护施工技术进行加固处理。

(2) 优化方案实施:材料选型方面,选用镀锌中空注浆锚杆,喷射混凝土采用1:2:2.5配合比,掺入0.8%钢纤维与高效减水剂,注浆材料选用水泥-水玻璃双液浆,钢筋网采用φ10@120×120。施工工艺方面,采用全站仪定位钻孔,液压钻机钻孔,高压注浆技术;喷射混凝土采用湿喷工艺,分层喷射,及时洒水养护。施工参数方面,锚杆间距1.3m,长度7m,直径28mm;喷射混凝土厚度14cm。质量管控方面,严格检验原材料质量,实时监测钻孔精度、注浆压力、边坡位移等指标,严格执行竣工验收标准。

(3) 实施效果分析:优化技术实施后,对边坡支护效果进行为期6个月的监测,结果显示:边坡水平位移最大值为3mm,垂直位移最大值为2mm,均控制在规范允许范围内;喷射混凝土表面无明显裂缝与空鼓现象,混凝土强度达到设计强度的115%;锚杆锚固力平均值为180kN,达到设计要求的1.2倍以上。与传统技术相比,优化后的支护技术使边坡稳定性提升40%,施工成本降低12%,施工工期缩短15%,取得了良好的技术与经济效益。工程实例优化前后效果对比见表3。

表3 工程实例优化前后效果对比

评价指标	传统技术效果	优化技术效果	提升幅度
边坡最大位移(mm)	15	3	80%
喷射混凝土强度(MPa)	28	32.2	15%
锚杆平均锚固力(kN)	120	180	50%
施工成本(元/m <sup>2</sup> )	320	281.6	-12%
施工工期(d)	60	51	-15%

### 5 结论

针对高边坡水利工程锚喷支护施工技术展开研究,分析了当前施工中存在的材料匹配不合理、工艺控制不精准、参数设计缺乏针对性、质量管控不完善等问题。提出从材料选型与配比、施工工艺、施工参数、质量管控四个维度进行优化,工程实例验证表明,优化后的锚喷支护技术可显著提升支护效果,降低施工成本与工期,具有较高的实用价值。

### 参考文献:

- [1] 牛鹏举,史剑侠.高边坡条件下水利工程锚喷支护施工技术优化研究[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛——绿色智造·采购革新专题.中原大河水利水电工程有限公司;濮阳黄河河务局渠村分洪闸管理处,2025:573-577.
- [2] 官志龙.水利工程泵站基坑锚喷支护体系监测技术研究[J].广东水利水电,2022,(07):57-60.
- [3] 林秋展.水利工程引水隧洞施工中锚喷支护的应用研究[J].内蒙古水利,2020,(06):66-68.