

水利工程中预应力锚索施工技术应用

孙 婧 任芝增

内蒙古河套灌区水利发展中心总干渠分中心 内蒙古 巴彦淖尔 015000

【摘 要】：现代水利工程建设当中，边坡支护、大坝加固、岩体稳定治理属于保证工程安全运行的关键部分。预应力锚索施工技术依靠锚固性能稳定、适应性强、对岩体扰动小、加固效果持久等特点，在水利枢纽、水库边坡、水工建筑物加固等各种工程中得到广泛应用。本文根据水利工程施工的特点，对预应力锚索技术的工作原理和技术优势进行系统的阐述，对钻孔、清孔、锚索制作与安装、注浆、张拉锁定、封锚等全过程的施工工艺进行详细的说明，并通过实际工程数据整理出主要的施工参数，分析施工过程中存在的主要问题及质量控制要点，提出工艺优化建议。经由实践可知，规范执行预应力锚索施工技术，可以明显改善岩土体整体稳定状况，降低水利工程边坡坍塌，岩体变形等安全风险，能给类似水利工程锚固施工赋予技术参照。

【关键词】：水利工程；预应力锚索；施工技术；质量控制；边坡加固

DOI:10.12417/2811-0528.26.17.062

引言

水利工程大多依附于自然山体修建，施工及运行期间容易受到水流冲刷、地质沉降、雨水渗透等各方面的影响，引发边坡滑移、岩体开裂、结构变形等病害情况，严重危及工程施工安全和长久运行的稳定。传统的砌体支护、普通锚杆支护技术存在加固深度小、受力性能差、耐久性差等问题，不能满足大型、复杂水利工程的支护要求。

预应力锚索施工技术依靠主动施加预应力，把岩土体松散结构同深部稳定岩体紧密联系起来，主动抵消岩土体内部应力，抑制岩体变形位移，达成深层加固和主动支护的双重效果。该技术适用于土石混合边坡、破碎岩体、深厚覆盖层等各种复杂的地质情况，施工方便，对原有的工程结构破坏小，经济效益和工程效益明显，目前已经成为水利工程岩土加固和边坡支护的主要技术。为了规范施工流程，提高施工质量，本文根据工程实践，对施工工艺、参数控制、质量保证措施进行全方位的探究。

1 预应力锚索技术概述

(1) 工作原理：预应力锚索主要由锚头、自由段、锚固段三部分组成，主要的工作原理就是用高强度的钢绞线作为受力载体，通过钻孔将锚索插入到深部稳定的岩土层中，然后通过注浆固结的方式使锚固段和周围岩体形成整体结构。待浆液达到设计强度之后，用张拉设备对锚索施加预设的预应力，把浅层岩土体的荷载传递到深部稳定岩层上，改变岩土体原始应力状态，抵消岩土体松弛产生的变形应力，限制裂隙发育和岩体位移，达到岩土体加固、边坡稳定的目的。与被动支护技术相比，该技术属于主动支护模式，可以提前预判并抑制岩土体变形，加固效果更具有主动性、稳定性。

预应力锚索结构组成示意图



图1 预应力锚索技术组成示意图

(2) 技术应用优势：根据水利工程复杂多变的施工环境以及长久使用的需要，预应力锚索技术应用的优势有四个。一是加固效果好，可以深层岩土体加固，能很好地解决浅层支护不能处理的深部岩体松动、滑移问题，提高结构整体稳定性。二是地质适应性强，可以适应坚硬岩体、破碎岩层、碎石土覆盖层等各种复杂的地质条件，满足大坝、溢洪道、引水边坡等不同的水工构筑物的支护要求。三是施工扰动小，钻孔施工孔径小，不会对原有岩土体和水工结构造成大面积破坏，适合既有工程加固改造和新建工程同时施工。四是耐久性好、经济性好，锚索防腐处理工艺，使用寿命长，施工工序简单、材料利用率高，相比传统支护方案综合施工成本低。

2 预应力锚索核心施工工艺流程

(1) 施工准备：施工前期准备工作包括现场勘查、设备校验、材料检验、方案交底四个方面。首先根据工程地质勘察报告，对施工区域的岩体结构、土层厚度、地下水分布情况进行核查，准确找到锚索孔位、孔径、孔深和倾角参数，避开岩体裂隙密集带和软弱夹层。其次做好施工设备选型及校验工作，主要设备有潜孔钻机、高压清孔水泵、注浆机、液压张拉千斤顶、应力检测仪等，所有张拉、检测设备必须提前完成标定校验，保证设备精度符合施工要求，防止设备误差造成施工质量不合格。材料上对钢绞线、锚固浆液、锚具等主要材料的

质量进行严格把控,钢绞线选用高强度低松弛的产品,表面无锈蚀、无弯折、无破损,力学性能符合水利工程施工规范。

(2) 钻孔施工: 钻孔是锚索施工的基础工序, 钻孔精度影响着锚索受力是否均匀、锚固效果的好坏。施工前根据设计图纸准确标定孔位, 做好点位复核, 偏差控制在规范允许范围内。钻机安装调平之后, 按照设计的倾角、孔深进行钻孔施工, 施工时保证钻机稳定, 防止机身晃动造成孔径偏移、孔道弯曲。根据不同的地质情况采用不同的钻孔工艺, 完整坚硬岩体用常规干式钻孔工艺提高钻孔效率。破碎岩体、碎石土覆盖层、地下水丰富的地区采用湿式钻孔工艺, 并做好孔壁防护, 防止孔壁坍塌、掉块。钻孔时实时观测地质变化情况, 发现空洞、超大裂隙等特殊地质时立即停止施工, 会同技术人员商量施工方案, 避免孔道质量出现缺陷。钻孔结束后核对孔深、孔径参数是否符合设计要求。

(3) 清孔处理: 钻孔后孔内会留有岩粉、碎石、积水等杂物, 如果清理不彻底, 会造成浆液与岩体粘结不紧密, 影响锚固力, 造成锚索受力不足、滑移等质量问题, 因此清孔工序十分重要。施工时采用高压风、高压水联合清孔法, 先用高压风将孔内松散的岩粉、碎石吹出, 再用高压清水反复冲洗孔壁, 直到孔内无杂物、流出清水无浑浊为止。清孔后立即做好孔口防护, 防止杂物再次进入孔道, 缩短清孔与注浆、锚索安装的时间间隔, 防止孔壁风干开裂、岩体松动, 保证孔道整体完整性。

(4) 锚索制作与安装: 锚索制作应在平整、干燥的施工现场集中加工, 严格按照设计尺寸裁切钢绞线, 保证尺寸准确、切口平整。裁剪后将钢绞线梳理理顺, 去除非粘附的油污、锈蚀物等, 防止粘附造成粘结不良。按照设计要求区分锚固段、自由段和张拉段, 锚固段设置架线环和隔离支架, 保证钢绞线间距均匀, 防止绞线缠绕, 保证注浆后浆液包裹均匀。自由段全处涂刷防腐油脂, 包上防护套管, 做防腐防水处理, 防止长时间水土侵蚀造成钢绞线锈蚀失效。锚索制作完成后进行外观和尺寸检查, 合格后才能进行安装工作。人工匀速将锚索推到孔底, 推送过程中防止用力过大造成锚索弯折、防护套管破损, 保证锚索居中、安放到位、位置准确, 无偏移、悬空情况, 保证后续注浆和张拉施工质量。

(5) 注浆施工: 注浆是锚索与岩体形成固结成型的关键工序, 在水利工程锚索施工中多采用常压注浆工艺, 浆液为水泥净浆, 按设计强度配比水灰比, 严格控制搅拌时间和搅拌速度, 保证浆液均匀、无结块、流动性好, 防止浆液离析影响固结强度。注浆采用孔底返浆施工方式, 将注浆管插入孔底, 均匀加压注浆, 随着浆液填充缓慢提升注浆管, 全程保证注浆管一直埋在浆液里, 避免孔内留有空气造成空洞。注浆时注意孔

口出浆情况, 待孔口不断有浓浆流出, 无气泡排出时继续稳压注浆几秒钟, 然后停止作业。对注浆后浆液沉降问题及时进行补浆处理, 保证孔道浆液饱满密实。注浆后做好养护防护工作, 防止外力干扰, 使浆液逐渐凝结硬化。

(6) 张拉锁定: 张拉锁定是预应力施加的重要工序, 必须在锚固段浆液、承压垫座混凝土强度达到设计要求之后才能进行。张拉前再次检查锚索安装质量、设备运行状况, 清除锚头杂物, 保证张拉作业条件。施工时用分级张拉的方法, 防止一次张拉应力过大造成岩体破坏、锚索断裂。分级张拉能很好地释放岩体应力, 保证预应力的均匀、稳定。每级张拉结束后稳定静置, 检测锚索伸长量和应力的变化情况, 与理论计算值进行比较, 如有偏差过大或者应力有异常变化, 即刻停止张拉, 查找问题并改正后才可继续施工作业。张拉到设计预应力值后, 再进行稳压, 然后进行锁定, 锁定时防止锚索的移动。

(7) 封锚防护: 锚索锁定后及时剪掉多余的外露钢绞线, 留出合理的防护长度, 防止钢绞线外露过长造成锈蚀、断裂。对外露锚头、钢绞线区域涂刷防腐涂料, 浇筑防护混凝土进行封闭处理, 做好外观修整, 保证防护层密实完整。封锚完成后清理施工现场, 同步做好边坡表面防护, 形成完整的支护体系闭环, 提高锚索长期运行的耐久性和稳定性。

3 核心施工参数控制

结合水利工程边坡支护、岩体加固施工实践, 整理出标准化施工参数, 严格控制各项指标, 保证施工质量。具体的施工参数见下表。

表1 施工参数

施工工序	核心控制参数	控制标准
钻孔施工	孔位偏差、钻孔倾角、孔深	孔位偏差 $\leq 50\text{mm}$, 倾角偏差 $\leq 1^\circ$, 孔深超设计值 $0.2\text{--}0.5\text{m}$
浆液配制	水灰比、搅拌时间	水灰比 $0.45\text{--}0.55$, 搅拌时间 $\geq 3\text{min}$, 浆液均匀无离析
注浆施工	注浆压力、稳压时间	常压注浆压力 $0.2\text{--}0.4\text{MPa}$, 稳压时间 $5\text{--}10\text{s}$
张拉施工	分级张拉、稳压时长、应力偏差	分 $3\text{--}4$ 级张拉, 每级稳压 5min , 终张拉稳压 $10\text{--}15\text{min}$, 应力偏差 $\leq \pm 5\%$
锚索安装	钢绞线间距、保护层厚度	钢绞线间距 $\geq 20\text{mm}$, 保护层厚度 $\geq 30\text{mm}$

参数控制时要联系工程地质情况灵活调节, 破碎岩体延长稳压时间, 降低张拉速率, 完整岩体可以提高施工效率, 保证

参数符合现场施工工况。

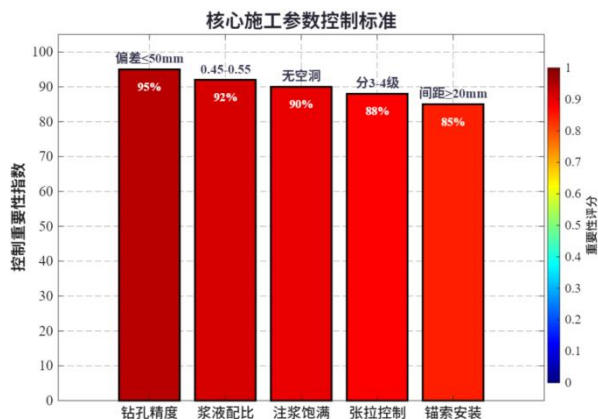


图2 施工参数控制

4 施工常见问题与质量控制措施

(1) 施工常见质量问题：根据水利工程现场施工情况，预应力锚索施工常见的质量通病有四个。钻孔质量不好，破碎的地层容易造成孔壁坍塌、孔径不均匀、孔道弯曲，造成锚索安装困难、受力偏移。二是注浆不密实，孔内杂物清理不彻底、注浆工艺不当，容易造成空洞、缝隙，减小锚固粘结力。第三，预应力损失超标，张拉设备精度不足、稳压时间不够、锚索防腐不到位都会造成后期应力衰减、预应力损失大、加固效果差。四、锚索安装偏差，绞线缠绕、居中效果不好造成受力不均，局部应力集中造成结构损坏。

(2) 全过程质量控制措施：为了防止施工质量隐患的发生，必须实施全过程的质量控制，即对施工的前期、中期和后期进行控制。前期严格做好材料进场复检、设备标定、技术交底等工作，杜绝不合格材料和设备进入施工现场，从源头上控制质量风险。

施工中期强化工序动态控制，钻孔阶段实时监测孔位、倾角、孔深，破碎地层用跟管钻孔工艺防止孔壁坍塌。清孔时严格按照风洗、水洗双重工艺进行，将孔内杂物全部清除。注浆阶段严格控制浆液配比和注浆速率，保证浆液饱满密实，做好补浆工作。张拉阶段严格实行分级张拉、稳压制度，及时观测应力和伸长量，数据有异常立即停止施工，严禁违章张拉。

参考文献：

- [1] 吕蕾,杨艳,廖宇,等.高压旋喷预应力锚索在地下室改造工程中的施工技术应用[J].四川建筑,2026,46(1):153-155.
- [2] 高利宁,王强.水利工程中预应力锚索施工技术的优化与应用[J].产品可靠性报告,2025,(10):172-173.
- [3] 辛双德.预应力锚索施工技术在滑坡治理工程中的应用探析[J].全面腐蚀控制,2025,39(5):105-107.
- [4] 王林.堆积体预应力锚索抗滑桩施工技术在白鹤滩水电站工程中的应用[J].中国水能及电气化,2024,(10):1-5.
- [5] 李鑫.高速公路高边坡工程中预应力锚索施工技术的应用研究[J].运输经理世界,2025,(8):37-39.

施工后期做好养护和检测工作，注浆完成后及时进行浆液养护，不得扰动锚索结构。封锚后对锚索进行应力监测、边坡位移监测，记录数据变化情况，出现应力衰减、岩体变形等隐患时及时处理。完善施工资料的记录，使每道工序都有迹可循，保证整体施工质量达到要求。

5 施工技术优化策略

(1) 智能化施工技术应用：传统的手工张拉精度低、数据误差大、人为因素影响大，可以采用智能张拉系统代替传统的施工方法。智能张拉设备可实现张拉应力、伸长量、稳压时间的自动精确控制，实时采集并保存施工数据，自动比较理论参数，出现异常立即发出警报，从而提高张拉精度，减少预应力损失，保证锚索受力均匀稳定，满足大型水利工程高精度施工的要求。(2) 复杂地质施工工艺优化：对深厚碎石土、破碎岩体、地下水丰富等复杂地质条件进行钻孔和注浆工艺的优化。钻孔使用跟管钻进技术，全过程保护孔壁，不出现坍塌、掉块。注浆采用二次注浆工艺，第一次注浆初凝后再做第二次补浆，填充浆液收缩缝，提高浆液密实度和锚固力。改进锚索防腐体系，加大自由段防护层厚度，采用多道防腐工艺适应潮湿、多水的水利施工环境，提高锚索使用寿命。(3) 施工监测体系完善：建立全过程动态监测体系，在施工阶段对钻孔精度、注浆饱满度、张拉应力参数进行监测，在运行阶段对锚索应力变化、边坡沉降位移、岩体裂隙发育情况进行监测。根据监测数据的变化情况来调整施工和运维方案，及时解决由于应力损失超标、岩体微变形等造成的支护体系稳定性问题。

6 结论

预应力锚索施工技术由于具有主动支护、深层加固、适应性强、耐久性好等特点，很好地解决了水利工程边坡岩体变形、结构失稳等问题，是提高水利工程岩土体稳定性的关键技术。本文通过对完整施工工艺流程的梳理，确定出主要施工参数，分析施工中出现的问题及质量控制要点，并用工程实例来检验技术的应用效果。施工过程中严格控制钻孔、清孔、锚索安装、注浆、张拉锁定、封锚全过程质量，根据地质情况优化施工工艺，采用智能化施工和监测技术，可以有效地减少施工质量隐患，减少预应力损失，提高锚固加固效果。