

Optimization and Engineering Application of Automation Tensioning Construction Technology for Slope Anchorage Cable

Xiangfeng Yan

Sinohydro Bureau 7 CO., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610213, China

Abstract

Prestressed anchor cables are commonly used support measures for the stability of high and steep slopes in hydraulic and hydroelectric engineering. However, manual pressure control and tensioning are prone to operational fluctuations and reading errors, often resulting in uneven graded loading, discrete locking forces, and missing verification records. Automated tensioning, centered on a complete set of jacks and pump stations, integrates graded pressure application, load holding, elongation measurement, and locking into a unified rhythm, enabling stable execution of tension control and elongation verification. This paper combines the construction practices of China's hydropower station shoulder and powerhouse slopes, proposing implementable process optimization points focusing on equipment matching, graded tensioning, and compensation for locking losses, and provides organizational and acceptance strategies for engineering applications.

Keywords

Water Resources and Hydropower; Slope Anchorage Cable; Automated Tensioning Construction; Process Optimization; Engineering Application

边坡锚索自动化张拉施工工艺优化与工程应用

严祥锋

中国水利水电第七工程局有限公司, 中国·四川成都 610213

摘要

边坡预应力锚索是水利水电工程高陡边坡稳定的常用支护措施,但人工控压张拉易受操作波动与读数误差影响,常出现分级加载不匀、锁定力离散与复核记录缺失。自动化张拉以成套千斤顶和泵站为核心,把分级加压、持荷、伸长量量测与锁定组织为统一节拍,使张拉力控制与伸长值校核能够稳定执行。本文结合中国水电站坝肩与厂房边坡施工实践,围绕设备匹配、分级张拉和锁定损失补偿提出可实施的工艺优化要点,并给出工程应用的组织与验收策略。

关键词

水利水电; 边坡锚索; 自动化张拉施工; 工艺优化; 工程应用

1 引言

水利水电枢纽建设中,坝肩、洞口及厂房开挖常形成高陡边坡,岩体节理裂隙与爆破扰动叠加后,浅表松弛与深部滑移风险并存。预应力锚索凭借其强度高、施工简便及经济实惠等优点在边坡支护工程中得到了广泛的应用^[1]。结合实践来看,锚索张拉阶段的受力控制直接决定锁定力水平与后期预应力衰减幅度,而工序交叉与人员差异会放大张拉偏差,影响边坡受力均衡。现行规范提出张拉力控制并以伸长量校核的双控思路,以保证张拉质量与可追溯性。本文从施工装备与作业方法出发,讨论边坡锚索自动化张拉的工艺优

化与工程应用。

2 边坡锚索自动化张拉施工工艺优化

2.1 设备标定与成套匹配优化

为确保边坡锚索自动化张拉在不同作业面实现可复制的力控精度,应把设备标定与成套匹配作为张拉工艺的首要校核环节。其一,设备进场前由项目试验室会同厂家对千斤顶、油泵、压力表及分配阀进行联合标定,采用分级加载至设计最大张拉力并保压读数,形成油压与输出力换算曲线和修正系数,现场按台班复核零点、回程灵敏度和卸载回摆,发现温漂或夹气迹象及时排气换油并复测加载区间。其二,依据锚具规格、钢绞线根数与控制应力选择额定吨位有余量的千斤顶,油泵流量与额定压力应覆盖同步张拉需求,高压油管按同等级耐压配套并统一长度,油路布置以短直为原则

【作者简介】严祥锋(1987—),男,中国四川南充人,工程师,从事水利水电施工及管理研究。

减少弯折与接头,连接后先做稳压检漏再投入作业,密封圈老化或渗漏立即更换并执行二次试压确认。其三,张拉前逐孔检查承压板与垫板平整度及孔口混凝土密实性,清理锚头端面浮浆碎屑并修整局部凸点,采用定位套筒校正千斤顶轴线与锚索中心线,锚头外露长度按工艺卡控制,夹片与锚环保持洁净干燥,必要时进行轻度预夹持,使坐楔受力均匀并降低偏心导致的滑移风险^[2]。其四,每个作业面首先进行试张拉,按预紧、分级加载与保压程序检查回油通畅、阀组切换和压力保持稳定性,同时复核自由段长度、钢绞线顺直度及孔口导向摩擦,核对伸长量与换算力值偏差,偏差超限时先调整换算表并排查油路阻滞或渗漏,再进入成批张拉,发现异常伸长或压力波动即停机复核。

2.2 分级张拉与锁定损失补偿优化

为把边坡锚索初始受力稳定锁定在设计区间,自动化张拉宜将分级加载与锁定补偿作为一套成组控制动作组织。其一,加载按小步递增实施,起始荷载取目标值的10%~20%,复核油压、千斤顶行程与承压板贴合并核对油压标定换算值后再进入后续级次,宜按30%~40%、60%~70%、90%~100%逐级逼近,每级到位后保持2~3 min,终级持荷不少于10 min,使钢绞线弹性伸长、锚具内缩和围岩压密充分完成,并控制加压与卸载速率平缓,避免冲击致夹片扰动。其二,张拉以力值闭合为主,伸长值作过程校核,按自由段长度与弹性模量计算理论伸长并扣除锚具内缩,逐级量测实际伸长与回弹,若偏差出现明显超限或曲线突变,应先检查孔口偏心、钢绞线缠绕、千斤顶不同心及锚固段微滑移,再以小幅回卸复张方式恢复稳定状态,确认正常后方可继续。其三,锁定损失补偿宜先做代表性试验,记录回卸瞬间千斤顶回缩量、锚具压缩量与夹片滑移量,按同型锚具分组给出补偿系数并在同批施工中滚动修正,放张前将目标锁定力换算为超张拉力并在终级持荷末端完成补张,若为短自由段或低回缩锚具,应同步校核回缩比例避免过补^[3]。其四,锁定操作采用短时恒压后缓卸放张,卸载过程中保持油压连续下降且不得跳降,夹片坐楔完成后复测外露钢绞线滑移量与锚头残余回弹,拆除千斤顶前应复核锚垫板与锚头同心并清理油污,必要时在30 min内复检锁定力并与测力计读数比对,将每级油压、力值、伸长、持荷时间、补张量及锁定回卸量完整填入记录表。

2.3 多孔协同与张拉姿态控制优化

面向边坡锚索成组布置的张拉工况,自动化张拉工艺应把多孔协同与姿态控制作为同一作业链条实施。其一,同一锚墩内多孔张拉宜采用对称交替或由中向外的序列,先以预紧力完成锚具就位与钢绞线理顺,再进入分级升压循环,配套多路分配油路保持统一节拍,单孔到级后稳压并读取压力与伸长量,待回缩量趋稳后转入相邻孔补偿加载,使锚墩受力逐步平衡,上一轮已锁孔在下一轮加载前应复核外露长度、夹片咬合及楔块坐入深度,出现滑移时采用小幅回张与

再锁定纠偏。其二,千斤顶与锚垫板的贴合姿态应在张拉前通过台座找平、垫片配比与支座限位校准,安装时以孔轴线、垫板中心线和千斤顶活塞行程三线同向控制,作业中持续检查承压面全幅接触、垫板翘曲及钢绞线束顺直度,若出现偏心受压、单侧先紧或夹片受力不匀,应立即卸压复位并调整垫片厚度,严禁带偏继续加压,以免锁定力离散与锚具磨损。其三,破碎带、卸荷裂隙或孔口涌水段应把分次加载与间歇观测固化为程序,初张阶段以较低压力确认孔口封闭和台座整体性,随后分级升压并在每级稳压期间观察锚墩位移、锚头回缩与渗水变化,伸长增量突变或回缩异常时应暂停,先补浆充填孔口松动区并加固连系梁,再按原级别复张复测后续级次,间歇期内避免相邻孔同时高压加载,待围岩变形趋缓后再继续升压。其四,锁定后按孔逐根核对锁定力、回缩量与夹片位置,锚头封闭与防护帽压紧后及时二次封浆,外露钢绞线清理涂脂并规范留长,雨季同步整治排水沟与滴水线,切割钢绞线前应复测外露长度并留出复张端部,封浆后检查孔口空鼓与裂缝并补封,现场资料同步记录锁定力与复测值以便交工。

3 边坡锚索自动化张拉施工工艺优化的工程应用

3.1 工序集成化组织与作业面布置

为将边坡锚索自动化张拉嵌入边坡支护的流水节拍,需以工序集成化组织统筹作业面布置。作业面划分宜以锚索排布、平台高差和运输路径为依据,将坡面分成若干张拉区段并设置固定泵站位并预留检修台位,泵站采用钢板或枕木找平并加设防滑楔块,千斤顶安放点与油管走向一次规划到位,管路沿平台内侧顺直敷设,转弯处用护槽与绑扎点限位,穿越人行通道时用桥架抬升并覆盖硬质盖板,落石区外侧布置护栏和缓冲垫,避免软管拖曳磨损与挤压渗漏。张拉进场应与孔内压浆终灌、锚墩混凝土龄期及喷护施工错峰衔接,开工前逐孔核对压浆量、变浆及封锚记录,抽检锚墩外观与强度指标,同时对锚具、夹片和千斤顶编号进行对照,确认孔口无回浆渗水、台座稳固后才组织批量张拉,若发现冒浆、夹泥或端面松动应先补封闭与加固并复检外露长度,再进入锁定工序。张拉实施应执行岗位分离的协同模式,油泵手负责分级升压、稳压与卸荷,量测员按级次同步读取油压与伸长并即时校核偏差,达到控制值后持荷至压力回落趋稳再记录,安全员在张拉端设置警戒区与防护挡板并指挥人员站位,交接班逐孔核对未完成级次、夹片磨损及备用密封件,工具锚、扳手与接头实行定置管理,减少停机。另外,边坡环境受风雨与温差影响时,作业区应设置临时遮挡、排水沟和防滑踏步,张拉前清理锚头泥砂并擦干端面水膜,低温条件下复核油温与钢绞线温差并适当延长持荷,锁定后立即封锚覆护,雨后复测锁定力并按程序补张^[4]。

3.2 质量验收与过程复核

为使边坡锚索自动化张拉优化工艺在现场可控可验,

质量验收与过程复核应贯穿每根锚索的加载、锁定与复检全过程。其一，开工前由监理牵头与施工共同制定张拉验收清单和记录模板，逐孔明确设计锁定力、分级加载值、持荷时长、理论伸长量计算依据、实测伸长量、锁定后滑移量及异常处置栏，张拉前复核孔口混凝土强度与锚垫板坐面平整度，千斤顶与压力表按批次校准并在班前完成零位核对，记录须随张拉同步签认并与材料合格证、钢绞线批号一并归档。其二，张拉实施中按比例开展见证复核与旁站，重点孔位或软弱结构面段实行全过程核对，检查油压与荷载换算、分级到位与稳压不少于规定时间，稳压阶段记录压力回落、补压次数与锁定指令执行情况，确认锚头清洁、承压板贴合、夹片坐楔均匀及防护套筒未受卡阻，若伸长量偏离理论区间或锁定回缩偏大，应立即停机复核自由段长度、孔内摩擦阻及锚具状态后再继续。其三，锁定后设置复张拉抽检程序，宜在 24 h 至 72 h 内抽检一定数量锚索，复测前拆除防护帽并清理锚垫板端面，按原级次缓慢加载至复核荷载并稳定读数，结合回缩量与荷载保持情况判定预应力损失，必要时采取补张拉或调整锁定力，补张拉结束后复核夹片咬合和锚具回位，并按规定恢复防护与封锚。其四，完工验收阶段将现场张拉记录与基本试验或抽检拉拔试验结果进行对照，按规定检查锁定力水平、锚固段工作状态及台座受压与裂缝情况，必要时复核锚垫板局部压碎与螺母外露长度，并同步检查封锚灌浆饱满与防护层完整，试验曲线、原始记录、旁站单和复检单统一编号装订，形成孔号可追溯的资料链并纳入竣工档案。

3.3 安全风险控制与耐久保护

边坡锚索自动化张拉在提高张拉一致性的同时，也使高压液压与高处作业风险在锚头工位叠加，因此工程应用应以全过程控制措施落实安全与耐久要求。其一，张拉区按作业半径设置围挡与警戒线，油泵、阀组和千斤顶连接后先低压循环检查油管鼓包、接头锁紧和泄压通道，压力表校验在有效期内，确认无渗漏再分级加载。加载时操作手与观察手分工固定，锚具正前方设禁入区，人员不得跨越油管或触碰阀组，停泵后先卸压再拆管，压力异常或异响立即停机复核。其二，高陡坡面先整平平台并清除锚头周边危石，脚手架与

临边防护经验收后使用。人员全程系挂生命绳并配防坠器限位，锚头附近佩戴面罩与防护手套，搬运张拉横梁与油缸设置牵引绳防摆动，遇强风、降雨与结冰停止作业，夜间施工采用均匀照明并由专人统一口令指挥，防止视线不足引起设备偏载。其三，锁定完成后立即进行锚头封闭与防腐处理，外露钢绞线除锈后涂抹防护脂或包覆防护带，锚具外侧安装密封帽并以砂浆或细石混凝土封护孔口。渗水段增设导排槽与滴水管保持干燥，锚头裂缝采用修补材料分层封堵并补做表面防水，减少水汽沿缝隙进入锚具区^[5]。其四，运行期管理单位宜按季度及汛后复查锚头区域，重点检查保护帽密封、渗水痕迹、台座裂缝与钢绞线锈蚀，对抽检锚索采用复核张拉核对锁定力与回缩量。发现密封破损及时更换并补涂防护脂，孔口封护松动及时修补，坡面排水沟与导水槽随淤随清，冻融敏感区结合裂缝发展及时复封，避免长期浸水与反复冻融作用。

4 结语

综上所述，边坡锚索自动化张拉的关键在于把分级加载、伸长量复核与锁定动作固化为标准节拍，并以成套装备与可检资料支撑全过程控制。工程应用中，作业面布置、工序衔接、质量复核与安全防护需要与张拉参数同等重视，才能在复杂地质与多工序交叉条件下保持锁定力稳定。施工阶段宜将锁定损失复核、锚头偏心检查和复张拉抽检作为常设控制点，确保异常能够及时处置。实践表明，按分级持荷与锁损补偿组织施工，可降低锚索锁定力离散度并减少返工。

参考文献

- [1] 谢华东.深厚覆盖层边坡预应力锚索施工关键技术与工艺优化[J].红水河, 2025(4).
- [2] 郭盼盼,龚晓南,魏支援.锚固段穿越双地层拉力型锚索拉拔力学模型及应用[J].中国公路学报, 2022, 35(12):10.
- [3] 张盼,穆晓东.浅谈某水利枢纽工程预应力锚索测力计联合标定试验[J].Architectural Design & Research, 2025, 6(9).
- [4] 杨善智.水库溢洪道预应力锚索施工技术的应用[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2023.
- [5] 严跃岗,袁朗冀,贾沼霖,等.两河口水电站消能区边坡锚索施工工艺研究[J].海河水利, 2023(4):64-67.