无粘结拉力型锚索在水利工程中的施工质量控制

夏 冬
中国水利水电建设工程咨询西北有限公司 陕西 西安 710000

摘 要：无粘结拉力型锚索具有防腐性能优越、承载机制明确、可长期监测预应力等优势，广泛用于水利工程高边坡加固、地下洞室围岩稳定及坝基抗浮等关键部位。但其施工涵盖造孔、编束、安装、注浆、张拉锁定及封锚等多道工序，任一环节失控均可能导致锚固失效，危及结构安全。本文立足水利工程实际，系统梳理无粘结拉力型锚索施工工艺流程，从钻孔精度、锚索制作安装、注浆密实度、张拉锁定与预应力损失控制四个环节，剖析质量影响因素并提出控制措施，为同类工程施工质量控制提供参考。

关键词：无粘结拉力型锚索；水利工程；施工质量

引言：水利工程高边坡、地下洞室及坝基抗浮等问题直接关系工程安全，预应力锚索作为主动加固手段作用关键。无粘结拉力型锚索因钢绞线受油脂与护套双层防护、与外层注浆体隔离，具有防腐可靠、应力分布均匀、可补张拉等优点，已成为水利边坡与洞室支护的首选形式。但该工艺工序多、隐蔽工程比重大，锚固质量难以通过常规手段全面验证，钻孔偏斜、注浆不密实、预应力损失过大等问题时有发生。本文从施工全过程质量控制角度出发，分析各工序控制要点，为水利工程无粘结拉力型锚索施工提供技术指导。

1 无粘结拉力型锚索的技术特征与适用条件

1.1 无粘结拉力型锚索的结构组成与受力机制

无粘结拉力型锚索由锚固段、自由段和锚头三部分组成。锚固段位于钻孔底部，钢绞线通过注浆体与岩体粘结，将锚固力传递至稳定岩层；自由段钢绞线被聚乙烯护套包裹并填充防腐油脂，与外层注浆体隔离，仅起传力作用；锚头由锚垫板、工作锚夹片和防护罩构成，用于张拉锁定和长期保护。受力机制为：张拉力经锚头传递至钢绞线，通过锚固段粘结力将荷载扩散至周围岩体。因自由段无粘结，拉力沿自由段均匀分布，锚固段应力集中程度较有粘结锚索显著降低。该结构可在运行期进行预应力监测和二次补张拉，弥补了有粘结锚索预应力损失难以恢复的缺陷。

1.2 无粘结拉力型锚索的技术优势

与有粘结锚索相比，无粘结拉力型锚索具有多方面优势。一是防腐可靠性高——钢绞线受油脂和PE护套双重防护，外注浆体腐蚀介质无法接触钢绞线表面，显著延长使用寿命，尤其适用于地下水腐蚀性较强的水利工程。二是应力分布均匀——自由段无粘结使张拉力沿全长均匀传递，避免了有粘结锚索在注浆体与钢绞线界面处的应力集中。三是可监测可维护——运行期可通过锚头测力计监测预应力变化，损失超允许值时进行补张拉，确保长期锚固效果。四是施工适应性好——无粘结钢绞线可工厂规模化生产，现场编束安装简便，降低了对施工环境的依赖[1]。

1.3 水利工程中的典型应用场景

无粘结拉力型锚索在水利水电工程中应用广泛。高边坡加固方面，在坝肩边坡、溢洪道开挖边坡及库区滑坡体等部位，通过锚索将不稳定岩体锚固于深层稳定岩层，控制边坡变形滑动，是确保边坡长期稳定的核心措施。地下洞室围岩稳定方面，在水电站地下厂房、引水隧洞及排水洞等大跨度洞室中，锚索用于控制围岩变形、维持洞室稳定、防止顶拱坍塌和边墙内鼓。坝基抗浮与闸墩加固方面，在重力坝坝基抗浮、闸墩预应力加固等部位，锚索提供抗拔力以平衡水压力。随着水利工程向高坝大库和深埋长隧洞方向发展，锚索应用规模和锚固吨位持续增长，施工质量要求日益提高。

2 施工工艺流程与质量控制关键环节

2.1 无粘结拉力型锚索的施工工艺流程

无粘结拉力型锚索施工涵盖钻孔、锚索制作、下索、注浆、张拉锁定及封锚六大环节。具体流程为：施工准备→钻孔定位→钻孔施工→清孔→孔道检验→锚索编束→安装锚索→注浆→待凝养护→安装锚头→张拉锁定→封锚防护，各环节之间存在严格的逻辑顺序和工艺衔接要求。其中，钻孔精度直接影响锚索受力方向和锚固效果，锚索制作质量决定预应力传递可靠性，注浆密实度关乎锚固段粘结承载力和防腐性能，张拉锁定则是建立有效预应力的最终环节。任一环节失控均可能导致锚固力不足、预应力损失过大甚至锚索失效，因此锚索施工必须实行全过程精细化管理，将质量控制关口前移

至每一道工序。

2.2 质量控制的总体原则

无粘结拉力型锚索施工质量控制应遵循四项总体原则。一是工序验收原则——每道工序完成后须经验收合格方可进入下道工序，隐蔽工程须留存影像和检测记录，确保可追溯性。二是材料双控原则——所有进场材料和构配件须同时提供出厂合格证和进场复验报告，无粘结钢绞线、锚具、夹片、注浆材料等关键材料合格后方可使用。三是参数精准原则——钻孔深度、角度、注浆压力、张拉力等关键技术参数须在设计允许误差范围内，不得随意调整。四是全程可溯原则——从材料进场到封锚完成的全部施工记录、检测数据、验收文件须完整归档，形成质量责任可追溯的完整证据链，贯穿锚索施工全过程作为现场质量管控的基本遵循。

2.3 关键工序识别与质量控制点设置

基于对锚索承载性能影响程度和施工质量易发生波动的环节分析，将无粘结拉力型锚索施工的关键工序识别为钻孔、锚索制作、注浆、张拉锁定四项，对应设置四个质量控制点。钻孔质量控制点控制孔径、孔深、孔斜及孔底沉渣厚度；锚索制作质量控制点控制钢绞线下料长度、编束排列、隔离架间距、注浆管安装及防腐层完好性；注浆质量控制点控制浆液配比、注浆压力、注浆量和注浆饱满度；张拉锁定质量控制点控制张拉程序、分级加载值、稳压时间、锁定值及预应力损失检测[2]。质量控制点实行“停止点”管理——关键工序完成后须经监理工程师检查签证方可进入下道工序，确保质量隐患及时发现、及时处置。

3 施工过程质量控制要点

3.1 钻孔精度控制

钻孔是锚索施工的第一道工序，也是影响锚固效果的基础性环节。钻孔偏差直接影响锚索的受力方向——当钻孔倾角偏差超过设计值时，锚索实际受力方向与设计方向产生夹角，削弱有效锚固力。钻孔孔径不足将影响锚索顺利下放和注浆体厚度，孔径过大则增加注浆量和成本。孔底沉渣过厚将导致锚固段钢绞线无法与稳定岩层有效粘结，是锚固力不足的常见原因。钻孔质量控制的核心措施包括：采用高精度钻机并安装导向架控制开孔角度，钻孔过程中每钻进5~10米采用测斜仪检测孔斜，发现偏差及时纠偏；终孔后采用高压风或水彻底清孔，直至孔口返水清澈、无岩粉沉渣；孔径和孔深采用孔径仪和测绳检测，确保达到设计要求。终孔验收合格后方可转入下道工序，未经验收不得下索。

3.2 锚索制作与安装质量控制

锚索制作直接影响预应力传递可靠性和长期耐久性。无粘结钢绞线应符合GB/T 5224标准，进场后逐盘检查护套完好性，破损处须用专用热缩管修补并检查气密性，严禁使用护套破损超标的钢绞线。编束时钢绞线应平行排列、每隔1.0~1.5米设隔离架，确保间距均匀、不交叉缠绕；注浆管采用耐压PVC管绑扎于锚索束中，管口距孔底不超过200毫米，确保由孔底向外注浆。安装时用导向锥和牵引绳配合吊车缓慢送入，避免护套刮伤；遇阻时查明原因处理，严禁强行贯入以防损坏护套或造成孔壁坍塌。安装到位后检查外露长度是否满足张拉要求，孔口临时封堵以防杂物落入。

3.3 注浆质量控制

注浆是最隐蔽且最难检验的环节，注浆体承担锚固段荷载传递和全孔钢绞线防腐双重功能，质量不合格将导致锚固力不足和预应力加速损失且事后难以补救。质量控制应抓住三个关键要素。浆液配比方面，宜选用P·O42.5及以上普通硅酸盐水泥，水灰比控制在0.40~0.50之间，可掺加减水剂和膨胀剂改善性能，配比须经工艺试验确定并严格执行。注浆压力控制在0.5~1.0MPa，速度均匀缓慢，确保浆液充分填充孔壁裂隙和钢绞线间隙，孔口返浆浓度与注入一致时方可停止。注浆饱满度方面，初凝前须补浆，确保浆体凝固后不形成空洞，注浆须连续进行，中断超时须清洗孔道后重新注浆[3]。

3.4 张拉锁定与预应力损失控制

张拉锁定是建立有效预应力的最终环节。张拉前须满足三个条件：注浆体和锚墩混凝土强度达设计值的80%以上；张拉设备经计量标定且在有效期内；锚垫板安装平整且与孔道轴线垂直。张拉采用分级加载方式，按设计张拉力的25%、50%、75%、100%、105%~110%逐级加载，每级稳压1~2分钟，最后一级稳压5分钟以上方可锁定，有利于各钢绞线均匀受力。预应力损失控制从三方面着手：采用超张拉补偿锚具回缩和钢绞线松弛损失；选用夹片锚具配合限位板控制回缩量；张拉完成后24小时内进行预应力检测，实测值低于设计值95%时需查明原因并补张拉，运行期应定期监测并适时补张拉。

4 质量通病分析及防治措施

4.1 钻孔偏斜与孔内事故

钻孔偏斜是锚索施工中最常见的质量问题，主要成因包括钻机安装不水平、钻进参数选择不当、遇软弱夹层或破碎带时钻头受力不均。钻孔偏斜的后果是锚索实际受力方向偏离设计方向，有效锚固力降低，严重时钢绞线无法顺利下放至孔底。防治措施：钻机安装时须用

水平尺校准，开孔段采用低钻压、低转速钻进，待导向管固定后再恢复正常参数；钻进过程中每5米测斜一次，发现偏斜及时纠偏；遇软弱夹层时应降低钻压、适当提高转速，必要时下套管护壁。当孔内发生卡钻、埋钻事故时，应记录事故位置和处理过程，评估对锚固效果的影响，必要时废弃原孔重新开孔。钻孔完成后应采用孔内摄像或声波检测仪检验孔壁完整性和孔径，确认合格后方可进入下道工序。

4.2 注浆不密实与孔内空洞

注浆不密实和孔内空洞是无粘结拉力型锚索最隐蔽的质量缺陷，也是危害最大的问题。主要成因包括：浆液水灰比过大导致收缩率偏高；注浆压力不足无法克服孔内水压和裂隙阻力；注浆管口位置不当导致孔底注浆不饱满；二次补浆不及时或补浆量不足。注浆不密实的后果是锚固段粘结面积减小、锚固力不足，自由段防腐层不完整导致钢绞线遭受地下水侵蚀。防治措施：严格控制水灰比在0.40~0.50范围内，必要时掺入适量铝粉膨胀剂补偿浆体收缩；注浆压力按设计值执行，孔内存在承压水时应适当提高注浆压力并延长注浆时间；注浆管应随锚索同步下至距孔底200毫米处，确保由孔底向上置换注浆；注浆完成后初凝前必须补浆，并记录补浆量。对重要工程部位，可采用声波透射法或钻孔取芯法对注浆饱满度进行抽样检测。

4.3 预应力损失过大

预应力损失是指张拉锁定后锚索预应力随时间推移逐渐降低的现象，是影响锚索长期加固效果的核心问题。预应力损失的主要来源包括：钢绞线松弛引起的材料损失——高强度低松弛钢绞线在长期恒载下仍会产生约2%~5%的松弛损失；锚具回缩引起的锁定损失——夹片锚具锁定时锚固端回缩导致预应力损失；岩体徐变和注浆体蠕变引起的长期损失——围岩在高应力下发生流变变形。预应力损失的控制应贯穿施工和运维全周期[4]。施工阶段采用超张拉和二次张拉工艺降低锁定损失；运行阶段建立预应力监测系统定期检测锚索荷载，当预应力损失超过设计允许值（通常为10%~15%）时进行补张拉。对于重要工程的关键锚索，建议安装振弦式测力计进行长期实时监测，将监测数据纳入工程安全监控体系。

4.4 锚头锈蚀与防护失效

锚头是锚索预应力保持和传递的关键部位，也是最易受环境侵蚀的薄弱环节。水利工程中锚头长期处于高湿度或浸水环境中，若防护措施不到位，锚垫板、夹片和工作锚圈将发生锈蚀，严重时可导致锚头失效。防护失效的主要表现包括：防护罩密封不严导致水汽侵入，油脂老化失去防腐功能，锚头混凝土封锚开裂。防治措施：锚头安装时应确保防护罩与锚垫板密封良好，接缝处涂密封胶；防护罩内注满专用防锈油脂，顶部设置排气孔确保注油饱满；封锚混凝土标号不低于C30，厚度不小于100毫米，配构造钢筋防裂；封锚前应对锚头进行全面除锈处理并涂刷防锈漆。运行期应定期检查锚头防护状态，发现封锚混凝土开裂、防护罩破损或油脂渗漏时应及时修复，确保锚头在全寿命周期内得到有效保护。

结束语

无粘结拉力型锚索在水利工程高边坡加固、地下洞室围岩稳定及坝基抗浮等关键领域发挥着不可替代的作用。本文从施工全过程质量控制角度出发，系统梳理了无粘结拉力型锚索的技术特征、施工工艺流程及质量控制关键环节，深入剖析了钻孔精度、锚索制作与安装、注浆密实度、张拉锁定等核心工序的质量控制要点，并针对钻孔偏斜、注浆不密实、预应力损失过大及锚头锈蚀等典型质量通病提出了防治措施。未来高坝大库和深埋长隧洞工程的发展对锚索锚固力、耐久性和智能化监测水平提出了更高要求，施工质量控制标准应随之持续提升。

参考文献

[1]杨建晖.改进拉力型锚索锚固性能及优化设计研究[J].广东建材，2026，42(5)：101-104.

[2]唐亚锋.拉力型锚索锚固段受力特征分析[J].四川建材,2025,51(3):151-154.

[3]王盟盟.水利工程施工中的质量控制与技术管理[J].模型世界，2026(11)：212-214.

[4]朱佳辉,张鑫伟,韩毅.水利工程项目中施工质量控制的智能化方法[J].科学技术创新,2026(2):161-164.