

预应力锚索工艺在水利大坝加固建设中的运用

应雷雷 范隆坤

浙江省水利水电建筑监理有限公司，浙江省杭州市，310000；

摘要：预应力锚索技术已成为水利大坝加固建设中的核心技术手段，广泛应用于坝体、坝基及边坡的稳定性提升，具有主动加固、受力可靠、经济高效等显著优势。该工艺通过在大坝结构中植入高强度钢绞线组成的锚索，并施加预应力，将不稳定或潜在滑移的岩土体“锚固”至深层稳定地层，从而显著提高结构的整体抗滑稳定性和承载能力。其核心作用机制是主动改善岩土体的应力状态，变被动承受为主动控制，尤其适用于存在软弱夹层、裂缝或抗滑稳定性不足的大坝工程。

关键词：预应力；锚索工艺；水利大坝；加固建设；运用

DOI：10.69979/3060-8767.26.05.054

预应力锚索技术已成为水利大坝加固中的核心技术手段，广泛应用于坝体稳定、裂缝修复和抗滑加固等关键环节。该工艺通过在坝体或坝基中植入高强度钢绞线锚索，并施加预应力，将不稳定岩体或混凝土结构“主动拉紧”，从而显著提升整体结构的稳定性与安全性。

1 关键施工工艺与技术要点

预应力锚索在水利大坝加固中是一种通过主动施加预应力，将大坝结构与深层稳定岩体连接，从而提升整体稳定性的关键技术。

1.1 关键施工工艺流程

施工准备与测量放线，根据设计图纸进行现场测量定位，精准放出锚索孔位，避开既有管线或结构。搭建安全可靠的作业平台，尤其在高闸墩或陡坡环境下需采用满堂支撑或模块化可移动平台。钻孔与清孔，采用轻型钻机施工，孔径通常为110-150mm，孔深可达数十米，须穿透滑动面进入稳定地层至少1m以上。遇破碎岩层时采用“套管跟进+高压风清孔”组合工艺，确保成孔质量。钻孔后使用高压风清除岩粉和积水，防止注浆不密实。锚索制作与安装，锚索材料宜选用低松弛高

强钢绞线(如ASTMA416标准270级,直径15.24mm),极限强度可达1860MPa。内锚段钢绞线需去除PE护套并清洗油脂,确保与浆体良好粘结;自由段则用PE管隔离,实现无粘结。组装时设置硬质塑料支架(间距约1m),保证钢绞线均匀分布,并安装灌浆管、排气管及PVC波纹管实现双层防腐保护。注浆,采用二次高压注浆工艺,首次注浆从孔底开始,水灰比控制在0.45-0.55,水泥采用32.5级以上普通硅酸盐水泥。二次注浆可提高锚固段密实度,增强抗拔力,同时对自由段进行封孔灌浆以防止锈蚀。张拉锁定,张拉前应对千斤顶等设备进行标定,采用分级加载方式,加载至设计荷载的105%-110%,并持荷不少于5分钟,以减少预应力损失。推荐使用“交错式对称张拉法”,避免结构受力不均,尤其适用于闸墩等关键部位。张拉完成后及时锁定,形成稳定预应力体系。封锚与监测,外锚头用混凝土封锚,防止锈蚀;同时安装监测元件,长期跟踪预应力变化与结构变形。实践表明,合理设计的锚索系统预应力损失较小,七年后仍可保持良好工作状态。

1.2 技术要点与优势

如下表

要点类别	核心内容
材料选择	高强低松弛钢绞线、PVC波纹管双层防腐、优质水泥浆体(强度 $\geq 40\text{MPa}$)
结构设计	内锚固于稳定岩体,自由段允许变形,外锚实现张拉锁定
防腐措施	涂防腐油、套波纹管、环氧涂层、PE护套等多重防护
适用场景	病险坝加固、新老混凝土结合面连锁、软弱夹层处理、高边坡与地下洞室支护
工程优势	施工灵活、不影响正常运行、节省投资、可显著提升抗滑安全系数

2 预应力锚索在水利大坝加固中的主要运用

2.1 坝体裂缝加固

预应力锚索在水利大坝加固中,针对坝体裂缝的加固具有主动施力、适应变形、长效稳定等核心优势,是

处理“活缝”与结构性裂缝的关键技术手段。在大坝运行过程中，由于温度变化、地基不均沉降或内部应力重分布，常出现贯穿性或深层裂缝，传统封堵方式难以应对反复张合，而预应力锚索通过在坝体内部施加可控的预压应力，将裂缝两侧的混凝土“压紧”，有效抑制裂缝扩展，提升整体结构刚度与抗滑稳定性。以某水库为例，工程采用“前堵后排，中间锚索”的综合方案，其中无粘结预应力锚索布置于202m高程廊道内，9束锚索设计张拉力达3000kN，成功解决了潮湿环境下钢绞线锈蚀及裂缝张开导致的应力集中问题，充分发挥了无粘结锚索适应坝体变形的能力^[1]。相比有粘结锚索，无粘结形式允许自由段在裂缝活动时产生微小位移，避免局部断裂，更适合处理动态裂缝。

2.2 坝基抗滑稳定加固

预应力锚索技术在水利大坝坝基抗滑稳定加固中发挥着关键作用。该技术通过主动施加预应力，有效增强坝基岩土体的整体性和抗滑能力，是一种高效、经济的加固方法。技术原理与构成，预应力锚索加固体系主要由内锚固段、张拉段和外锚固段三部分组成。其核心原理是在坝基潜在滑动面或软弱岩层中钻孔，将锚索的内锚固段固定于深部稳定岩体内，然后对外露的钢绞线进行张拉并锁定，从而对不稳定岩体施加一个持续的、指向稳定区域的压应力。这个预压应力能显著增大滑动面上的正压力，进而提高其抗剪强度，阻止滑移变形。在坝基抗滑稳定加固中的主要应用与优势，主动加固与应力改善：预应力锚索属于主动支护技术，能预先改善坝基岩体的应力状态，形成连续的压缩带，将可能松散的岩体挤压成一个更稳定的整体，从根本上提升抗滑稳定性。减少开挖与保护环境：相较于大规模开挖换填等被动加固方式，锚索技术只需钻孔施工，极大减少了土石方开挖量和对坝体周边环境的扰动，特别适用于已建水库的坝基加固工程。增强整体性与承载力：通过将锚索锚固于深层稳定岩层，可将坝体荷载部分传递至更深的稳定地基，优化了坝基的受力分布，提高了坝基的整体承载能力和安全性。应用于复杂地质条件：该技术适用于加固存在软弱夹层、断层或潜在滑动面的坝基。关键技术要求与施工要点，精准定位：锚索孔的定位与方向控制至关重要，钻孔需精确穿过预定滑动面，定位误差通常要求控制在±50毫米以内。分级张拉与锁定：张拉过程需分级进行，并超张拉至设计荷载的105%-110%，

持荷一段时间以减少后期预应力损失（如钢绞线松弛、岩体蠕变等），确保长期有效性。规范施工流程：完整的施工流程包括造孔、编索、内锚固段安装（采用灌浆或机械方式）、张拉锁定以及最终的封锚灌浆，形成永久防护。材料与工艺发展：现代预应力锚索技术不断发展，压力分散型锚索、可回收锚索以及采用高强度、耐腐蚀材料（如碳纤维）的锚索已得到应用，并形成了如《80m级压力分散型锚索施工工法》等技术规范，提升了技术的可靠性与适应性。

2.3 高边坡与坝肩加固

预应力锚索在水利大坝加固中，特别是针对高边坡与坝肩的加固，是一项关键且成熟的技术。其核心原理是通过深入稳定岩体的锚索施加预应力，将锚固力传递至不稳定岩体或结构，从而增强整体稳定性。预应力锚索在高边坡加固中的应用，水利工程中的高边坡，如水库溢洪道边坡或导流隧洞出口边坡，地质条件复杂，稳定性至关重要。预应力锚索技术通过主动加固，有效应对此类挑战。主要作用机制，主动加固：在坡体深部稳定岩体上施加预应力，主动向不稳定坡体传递锚固力。改善岩体力学状态：挤压松散岩体，增加岩体间的正压力与摩擦力，提升整体抗滑力。限制变形发展：约束不稳定岩体的变形与滑动趋势，防止灾害发生。关键施工流程与技术要点，以某水库高边坡加固工程为例，具体应用包括以下环节：测量放线与平台搭建：依据设计进行精确测量定位，搭建稳固安全的施工平台。钻孔：使用专用钻机（如QCW100型）进行跟管钻孔，严格控制钻孔角度与深度，确保孔壁平直。钻孔后需彻底清孔。锚索安装：安装前核对锚索编号与长度，并彻底清理锚孔。安装时需保护锚索体完整，避免污染，并安装测力计进行监测。灌浆施工：常采用孔底灌浆法，灌浆压力需超过2.5MPa，确保浆液饱满密实。锚索张拉：待锚墩及注浆体达到足够强度后，分级进行张拉。通常先预紧，再逐级拉伸至设计荷载，并可能进行超张拉以检验可靠性。锚头防护：张拉完成后，需对自由段进行密封灌浆并加强外锚头保护，防止腐蚀。预应力锚索在坝肩加固中的应用，坝肩是坝体与两岸山体的连接部位，其稳定性直接关系大坝安全。预应力锚索在此处的应用原理与高边坡加固类似。加固目的：增强坝肩岩体的整体性与抗剪强度，防止因地质缺陷或水压力导致的坝肩变形、滑动或渗漏。技术优势：能够将集中荷载有效分散

至深部稳定岩体,适用于加固坝肩存在裂缝、软弱夹层或断层等地质缺陷的区域。应用中的主要影响因素与策略,预应力锚索技术的成功应用,需充分考虑并应对以下影响因素:地质因素:复杂的地质构造、断层、裂隙发育及岩体风化程度直接影响锚固效果与边坡稳定性。环境因素:降雨、地震等会加剧岩体软化、增加下滑力或动水压力,威胁边坡稳定。水的作用:水会软化岩土体,降低其强度,并形成静水压力与动水压力,是诱发失稳的关键因素之一^[2]。为提升应用效果,需注重全过程质量控制,从精确测量、稳固钻孔、规范安装、严密灌浆到精准张拉与完善防护,每一环节均需严格遵循设计与规范要求。预应力锚索技术通过其主动、深层的加固机制,在水利工程高边坡稳定与坝肩加固中发挥着不可替代的作用,是提升大坝整体安全性与耐久性的重要技术手段。

2.4 大型地下洞室与闸墩加固

预应力锚索是一种通过施加预应力对岩体或建筑物进行主动加固的锚固技术,在水利水电工程的加固领域,尤其是在大型地下洞室与闸墩的加固中,发挥着至关重要的作用。预应力锚索的技术原理与优势,预应力锚索通常由内锚固段(锚固于深层稳定岩体)、张拉段(自由段)和外锚固段(锚头、承压结构等)组成。其核心原理是,通过钻孔将高强度钢绞线或钢丝锚固于工程结构需要加固的部位及深层稳定岩层中,然后进行张拉,主动向被加固结构(如洞室围岩、闸墩)施加一个压应力。这种“主动支护”方式能够有效改善结构的受力状态,限制变形,增强整体稳定性。相较于被动支护,它具有概念明确、经济合理、能提供柔性且可控的支护抗力等显著优势。在大型地下洞室加固中的应用,大型地下厂房、主变室等洞室是水利枢纽的关键组成部分,其顶拱和高边墙的稳定直接关系到工程安全。预应力锚索在此类工程中的应用主要体现在:控制围岩变形与稳定顶拱:对于跨度大、围岩地质条件复杂(如存在泥化夹层、断层)的地下洞室,预应力锚索可与系统锚杆、喷混凝土等联合使用,形成综合支护体系。通过计算分析确定所需的支护力,锚索被设计为特定的吨位(如1500kN、3000kN级)、长度(如25m)和间排距(如4.5m×6.0m),深入稳定岩层,为不稳定岩体提供主动

约束力,防止顶拱屈服域扩大和坍塌。工程实例与技术细节:以小浪底水利枢纽地下厂房为例,其主厂房顶拱因存在多层连续泥化夹层,采用了325根1500kN级、长25m的预应力锚索进行加固。锚索设计需综合考虑地质力学模型试验、有限元数值模拟和工程类比。施工工艺包括精密测量定位、钻孔、锚索组装(含钢绞线、PVC波纹管、防腐处理等)、灌浆、张拉锁定以及外锚头保护等一系列严格工序,确保锚索长期有效。三峡水利枢纽船闸边坡也大规模应用了设计承载力达3000kN的预应力锚索进行系统加固。高吨位锚索的发展:随着技术进步,预应力锚索的单束锚固吨位不断提升,从早期的2400-3200kN级,发展到6000kN、8000kN乃至10000kN级,以满足更大规模、更高难度地下工程加固的需求。在闸墩加固中的应用,闸墩作为泄水建筑物的关键受力结构,承受着巨大的水推力、水流冲击等复杂荷载。预应力锚索对其加固的主要作用体现在:改善结构受力状态:对闸墩施加预应力,可以主动调整其内部的应力分布,抵消部分由水荷载产生的拉应力,增强闸墩的整体性和抗裂能力,从而改善其结构受力状态。提升抗滑稳定性与分散荷载:对于坝基或坝肩部位的闸墩,预应力锚索可深入基岩,提高闸墩与基础的抗滑稳定性。同时,该技术也能用于分散闸墩承受的集中荷载,优化力流传递路径。材料与工程实践:精轧螺纹钢等高强度材料常作为预应力锚杆(索)的核心杆体,应用于大坝闸墩的加固,以承受复杂荷载并保障长期安全。中国的预应力锚固技术最早便应用于坝体加固,1964年梅山水库右岸坝基加固工程首次采用了长30~47m的预应力锚索。

总之,预应力锚索技术通过其主动加固、应力改善和深部锚固的机理,成为解决水利大坝坝基抗滑稳定问题的有效手段,在保障大坝长期安全运行方面具有显著的技术和经济优势。

参考文献

- [1]王芳,浅谈预应力锚索工艺在水利大坝加固建设中的运用.2023.
- [2]刘晓丽,预应力锚索工艺在水利大坝加固建设中的运用探讨.2024.