

Quality control of excavation for long tunnels in water conservancy projects

Song Wu

Sinohydro Bureau 10 Co., Ltd., Dujiangyan Irrigation Project, Dujiangyan, Sichuan, 611830, China

Abstract

The diversion tunnel of the Chuosijia Hydropower Station, located in Aba Prefecture, Sichuan Province, is a key engineering component for water conveyance and energy conversion in the station. The tunnel has a total length of 21.185 km, with the current contract section measuring 12.3 km. It includes two cross-sectional forms—a flat-bottomed horseshoe shape and a circular shape—passing through Class III, Class IV, and Class V surrounding rock. During the excavation of such a long tunnel, quality control is particularly challenging due to variations in geological conditions, surrounding rock stability, the quality of support and lining, and construction organization and management. To ensure safety and durability, it is essential to strengthen technical preparation and geological investigation in the early stages, adopt excavation methods and support techniques suited to each cross-section, strictly control cross-sectional accuracy and minimize surrounding rock disturbance during construction, and establish a comprehensive monitoring and risk prevention system. These measures enable full-process and full-cycle quality control, thereby ensuring the long-term stable operation of the hydropower project.

Keywords

long tunnel; excavation quality control; surrounding rock stability; support and lining; hydraulic engineering

水利项目长大隧洞开挖质量控制

吴淞

中国水利水电第十工程局有限公司, 中国·四川·都江堰 611830

摘要

绰斯甲水电站引水隧洞位于四川省阿坝州,是该电站水资源输送与能量转化的关键工程环节。该隧洞总长21.185km,本标段长度12.3km,涵盖平底马蹄形与圆形两种断面形式,穿越Ⅲ类、Ⅳ类及Ⅴ类围岩。长大隧洞开挖施工过程中,受地质条件变化、围岩稳定性、支护衬砌质量及施工组织管理等因素影响,质量控制难度较大。为确保工程安全性与耐久性,需在施工前期加强技术准备和勘察分析,合理选择断面开挖方法与支护工艺,严格控制施工过程中的断面精度和围岩扰动范围,并辅以完善的监测和风险防控体系,实现对开挖质量的全过程、全环节控制,从而为水利工程长期稳定运行提供保障。

关键词

长大隧洞; 开挖质量控制; 围岩稳定; 支护衬砌; 水利工程

1 引言

长大隧洞作为水利枢纽工程中的重要组成部分,承担着水流输送和能量转换的核心功能,其施工质量直接影响工程整体效益与运行安全。绰斯甲水电站引水隧洞具有长度大、断面形式多样、穿越围岩类型复杂等特点,施工环境存在高地应力、局部不良地质及长距离衬砌施工等挑战。在这一背景下,科学的开挖质量控制不仅是减少地质扰动、保障围岩稳定的前提,也是确保衬砌结构安全性和耐久性的基础。针对长大隧洞的施工特点,需要在设计、施工、监测及风险防控等环节形成有机衔接,通过优化工艺参数、强化

过程管理和应用实时监测手段,实现从源头到过程的质量把控,从而确保工程按期、高质量完成并满足长期运行需求。

2 水利长大隧洞开挖工程概况

2.1 绰斯甲水电站引水隧洞工程总体布局与功能定位

绰斯甲水电站位于四川省阿坝州壤塘县与金川县交界处,是绰斯甲河梯级开发规划的第三级电站,采用闸坝引水式布置方式。电站由首部闸坝、左岸引水系统和厂区枢纽构成,水库总库容 116.2 万 m³,调节库容 47.9 万 m³,装机容量 392.0MW,引水隧洞总长 21.185km。本工程标段范围为(隧)3+000至(隧)15+300,全长 12.3km,承担将上游水流稳定引至厂区的任务。隧洞沿线地质条件复杂,需兼顾低压和高压两种运行工况,对断面尺寸精度、围岩扰动控制和衬砌防护性能提出严格要求。

【作者简介】吴淞(1983-),男,中国四川遂宁人,本科,从事水利水电研究。

2.2 隧洞断面形式与围岩类别分布特征

引水隧洞穿越多种地质条件,断面形式包括平底马蹄形和圆形两种。低压段位于(隧)10+588.00桩号上游,围岩以Ⅲ类为主,采用底宽7.0m、高10.0m的平底马蹄形断面,结构有利于施工机械作业和排水布设。高压段位于(隧)10+588.00桩号下游,围岩多为Ⅲ类、Ⅳ类及Ⅴ类,采用内径8.9m的圆形断面,钢筋混凝土衬砌以适应较高的水压环境。Ⅲ类围岩具备一定稳定性,开挖时需挂网锚喷支护以限制局部松动;Ⅳ类围岩强度较低,变形敏感性较强;Ⅴ类围岩极为破碎,需全断面支护并加强监测。断面与围岩条件的匹配设计,既满足水力学要求,也为质量控制提供依据^[1]。

3 长大隧洞开挖前的技术准备与质量控制要求

3.1 围岩地质勘察与分类结果在开挖方案中的应用

长大隧洞开挖前的地质勘察需覆盖全线,采用钻探、槽探及地测测绘相结合的方式获取围岩结构、岩性及地下水分布信息。通过地质分级将围岩划分为Ⅲ类、Ⅳ类和Ⅴ类,结合断面形式确定不同区段的开挖方法与支护形式。Ⅲ类围岩区段在设计中采用马蹄形断面并配置锚喷支护,Ⅳ类及Ⅴ类围岩则采用圆形断面并辅以厚衬砌和注浆加固,以提高结构安全裕度。地质勘察数据还用于预测不良地质段落的分布范围,指导超前地质预报与风险防控布置,确保施工中可快速调整工艺参数。

3.2 施工图设计审核与工序衔接计划编制

施工图设计审核旨在确保设计成果与现场地质、施工条件高度匹配。审核过程中重点核对断面尺寸、衬砌厚度、支护参数等关键指标是否满足结构受力及水力学要求,并结合地质分布合理布置施工工序。工序衔接计划以保证开挖、支护、衬砌等环节无缝衔接为目标,减少暴露时间,降低围岩失稳风险。对于高压段,应在开挖完成后尽快进行初期支护和衬砌施工,避免地下水渗透造成结构劣化。

3.3 施工设备、监测仪器与材料的质量检验与配备

隧洞开挖需配置高性能钻爆设备、装载与运输机械,以及混凝土衬砌台车等施工装备。钻机功率达到45kW以上可保证爆破孔钻进效率,装载机铲斗容量在2.5m³左右以匹配出渣运输强度,衬砌台车一次作业覆盖长度为9m确保衬砌效率。监测仪器包括全站仪、激光断面仪及多点位移计,精度达到±1mm可实时获取围岩变形及断面变化数据。混凝土材料进场时需进行强度、坍落度和水胶比检测,钢筋则需进行屈服强度和伸长率检验,保证实际性能达到设计标准。

4 不同断面及围岩条件下的开挖质量控制要点

4.1 低压段平底马蹄形断面开挖精度与支护质量控制

低压段平底马蹄形断面施工中,开挖精度直接关系到隧洞断面水力条件与结构受力状态。底宽7.0m、高10.0m的断面尺寸必须通过精确测量与复核予以保证,钻爆作业应

采用合理的炮孔布置方式和控制装药量,以减少超挖、欠挖带来的后续补砌与支护偏差。爆破完成后应及时清理浮石、松动块体和残渣,保证支护面坚实无松动层。喷射混凝土厚度要严格按照设计执行,均匀密实且与围岩充分结合,钢筋网与锚杆布设需与拱顶及边墙曲线贴合,锚杆锚固深度、角度和间距保持一致,确保受力均匀。

4.2 高压段圆形断面及高围压条件下的稳定性保障

高压段圆形断面施工需在保证结构精度的同时,强化高围压条件下的稳定性控制。钻爆施工应以控制振动为核心,通过优化炮孔直径、深度及装药量减少对围岩的冲击。开挖作业采取分段分部方式,保证工作面与支护面的距离不超过规定限值,使围岩在受力状态下尽快得到支护约束。初期支护采用钢筋混凝土结构时,应严格控制衬砌厚度和配筋密度,浇筑混凝土时需确保振捣充分、养护到位,以承受运行期可能达到数兆帕级别的水压力^[2]。在节理裂隙发育、渗水量较大的地段,开挖前必须进行超前注浆封堵,降低渗水对围岩及衬砌的削弱作用。

4.3 Ⅲ类、Ⅳ类、Ⅴ类围岩差异化开挖及衬砌质量管控

Ⅲ类围岩具有较好整体性和承载力,开挖时应控制爆破能量,减少扰动并保持开挖轮廓完整,支护可采用喷射混凝土结合系统锚杆和局部加固的模式,保证结构稳定和耐久性。Ⅳ类围岩强度偏低,节理裂隙发育,对振动和暴露时间较为敏感,开挖作业需缩短支护间隔时间,喷射混凝土厚度适当增加,配合钢拱架和锚杆提升承载能力,并在高风险区实施超前支护。Ⅴ类围岩破碎严重,自稳能力极弱,开挖前应进行全断面超前支护,辅以高强度喷射混凝土、双层钢筋网和全断面注浆加固,必要时分部短进尺施工以控制变形。衬砌质量管控需根据不同围岩类别调整厚度与配筋参数,Ⅲ类围岩区段以防渗和耐久为主,Ⅳ类与Ⅴ类围岩区段则以提高承载力、抑制变形为重点。全过程需结合监测结果动态调整施工方案,确保围岩与衬砌形成稳定、可靠的整体结构,满足长大隧洞安全运行和设计寿命要求,图1为Ⅲ1类和Ⅲ2类的围岩低水头段衬砌断面工程图。

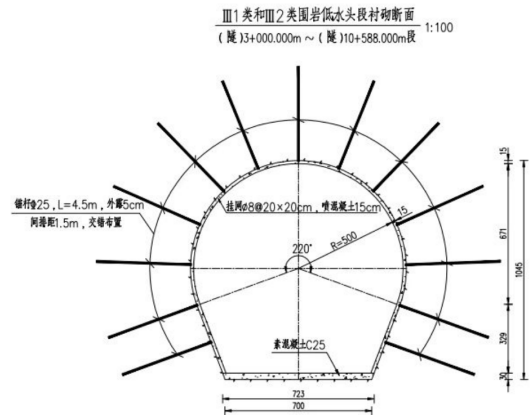


图1 Ⅲ1类和Ⅲ2类的围岩低水头段衬砌断面工程图

5 长大隧洞开挖过程中的监测与风险防控

5.1 开挖断面几何形态及超欠挖的实时监控

长大隧洞施工中,断面几何形态的精确控制是保证衬砌厚度均匀、结构受力合理以及水力条件稳定的基础。施工过程中应依托全站仪、激光断面仪和三维激光扫描等高精度测量设备,在每个循环进尺完成后第一时间进行断面复测。测量数据应与设计断面进行比对,超挖部位需采用高标号混凝土或喷射混凝土回填修整,欠挖部位及时补挖至设计轮廓,避免局部衬砌厚度不足引发结构薄弱区。建立断面监控台账,对每个断面开挖精度、超欠挖修整记录和施工班组质量表现进行归档,形成可追溯的闭环管理机制,从而实现断面成型质量的全过程精准控制^[3]。

5.2 围岩变形与支护结构受力的动态监测与分析

围岩变形与支护结构受力变化是反映隧洞稳定状态的重要指标,必须在施工全过程保持连续监控。监测系统应包括收敛仪、多点位移计、钢拱架应力计以及锚杆内力计等装置,布设位置覆盖拱顶、拱腰和边墙等关键部位。在初期支护完成后的早期阶段,监测频率应达到每日一次或根据围岩变形速率调整,确保能够捕捉到变形加速或受力突变的预兆。数据分析需结合围岩类别、节理裂隙特征、地下水情况及施工方法,建立围岩-支护协同受力模型,判断现有支护是否满足稳定性要求。当监测值接近设计控制阈值的80%时,应立即进行工况评估,并采取加固措施,如增加喷射混凝土厚度、加设锚杆、改用高强度钢拱架或实施二次衬砌提前施工。

5.3 突水、突泥及坍塌等不良地质灾害的预防与应急处置

长大隧洞在穿越断裂带、破碎带及高含水层时,易出现突水、突泥和坍塌等严重地质灾害,对施工安全与工期影响显著。预防阶段应开展超前地质钻探和地质雷达探测,掌

握前方围岩结构、水文条件及不良地质体分布,并根据预测结果实施超前注浆、帷幕灌浆、管棚支护等措施以加固围岩、降低渗透系数^[4]。施工中遇突水或突泥时,应立即封闭掌子面,启用大功率排水泵将涌水量控制在设计可承受范围,并在涌水点实施快速封堵和二次注浆加固。坍塌风险区应采取短进尺、强支护、快封闭的施工策略,必要时增加临时钢支架和背衬板以防止二次塌方。项目部需建立详细的应急处置预案和物资储备清单,包括封堵材料、排水设备、支护构件及应急照明装置,并定期组织演练,确保施工人员熟悉操作流程。

6 结语

长大隧洞开挖质量控制贯穿于施工准备、过程执行与风险防控的各个环节,是保障水利工程安全性、耐久性和经济性的核心。绰斯甲水电站引水隧洞在长度、断面形式和地质条件上的复杂性,对开挖精度、支护稳定性和衬砌质量提出了更高要求。通过科学的地质勘察、合理的设计审核、精准的施工控制以及完善的监测体系,可有效应对不同围岩条件下的施工挑战,降低不良地质灾害发生概率。全过程管理不仅能够确保结构满足运行期高水压和长期荷载要求,也为同类水利长大隧洞工程提供了可借鉴的质量控制思路与技术路径,从而实现工程效益与安全目标的协同发展。

参考文献

- [1] 范志峰.水利工程中引水隧洞施工控制测量的技术要点[J].全面腐蚀控制,2025,39(07):71-73.
- [2] 杨家桃.水利工程隧洞开挖施工关键技术探析[J].全面腐蚀控制,2025,39(07):129-131.
- [3] 张红星.水利工程施工中引水隧洞施工技术研究[J].科技与创新,2025,(13):208-211.
- [4] 刘少森.水利隧洞施工二衬台车逐窗入模浇筑改造技术研究[J].建筑机械,2025,(07):273-275+279.