

水工隧洞开挖施工工艺流程研究

姜柏春

新疆北方建设集团有限公司 新疆 奎屯 833200

摘要: 水工隧洞是水利水电工程中用于引水、输水、泄洪及排沙的关键水工建筑物,其开挖施工具有地质条件复杂、断面形态多样、围岩稳定要求高、衬砌结构承载要求严格等技术特点。本文系统梳理了水工隧洞开挖施工的全流程工艺,将施工过程划分为施工准备与洞口段处理、洞身开挖循环作业、围岩支护与初期衬砌、防排水系统施作以及二次衬砌与灌浆等五个阶段,对各阶段的核心工序、技术要点和质量控制要求进行了深入分析。重点探讨了钻爆法开挖中的循环作业组织、光面爆破技术参数控制、围岩分类与支护动态设计原理、以及衬砌混凝土浇筑与回填灌浆的工艺衔接关系。研究认为,水工隧洞开挖施工工艺的核心在于建立“开挖—支护—衬砌”三者之间的合理时序与强度匹配关系,将围岩的自承能力与人工支护体系有机结合,最终形成安全可靠的水工隧洞围岩—支护联合承载体系。

关键词: 水工隧洞; 开挖施工; 钻爆法; 循环作业; 围岩支护; 衬砌施工

引言

从大型水电站的引水隧洞到长距离调水工程的输水隧洞,水工隧洞的建设规模和技术难度持续攀升,隧洞长度不断增加、埋深持续增大、地质条件日趋复杂,对开挖施工工艺提出了越来越高的要求。水工隧洞区别于交通隧道和矿山巷道的显著特征在于其水工功能的特殊性。隧洞衬砌不仅要承受围岩压力,还需承担内水压力作用,对衬砌结构的防渗性能和抗裂性能有严格要求。同时,水工隧洞对过流断面的平整度要求较高,过度超挖将导致衬砌厚度增加和工程量增大,而过度的欠挖则缩小过流断面,影响输水能力。这些功能要求决定了水工隧洞开挖施工工艺的独特性——既要保证开挖尺寸的精确控制,又要最大限度地减少对围岩的扰动,为后续衬砌结构创造良好条件。钻爆法仍是当前水工隧洞开挖的主流施工方法,尤其在中长距离、大埋深和复杂地质条件下的隧洞工程中具有不可替代的地位。全断面隧道掘进机法虽然在特定条件下具有速度优势,但其对地质条件的适应性和经济合理性仍存在较大局限。因此,研究钻爆法开挖的施工工艺流程,对确保水工隧洞工程的安全、质量和进度具有重要的现实意义。

1 施工准备与洞口段处理

1.1 施工前的技术准备

水工隧洞开挖施工启动之前,技术准备工作是保障后续作业顺利推进的基础。技术准备的核心内容包括:

施工图纸的会审与地质资料的复核,重点确认隧洞轴线、纵坡坡度、断面尺寸及衬砌类型等技术参数;编制实施性施工组织设计和专项开挖施工方案,明确开挖方法、循环进尺、支护形式及排水措施;进行测量控制网的布设与复核,确保洞内控制点的精度满足规范要求;对进场施工人员进行技术交底和安全培训,使一线作业人员充分掌握开挖工序的质量标准和操作要求。

1.2 洞口边坡处理与截排水系统

洞口段是水工隧洞施工的首道工序,也是围岩条件最不稳定、施工风险最高的区段之一。洞口开挖前应在洞口上方及两侧设置完善的截排水系统,包括截水沟、排水沟和沉淀池,拦截坡面径流,防止地表水涌入开挖工作面造成边坡失稳或洞内积水。洞口边坡的明挖应根据地质条件确定合理的开挖坡比,必要时采取锚喷支护或挡墙加固措施^[1]。对于覆盖层较薄或风化破碎的洞口段,常需在洞脸位置施作管棚或超前锚杆支护,形成“棚护”效应,为洞身的进洞施工提供安全保障。

1.3 洞脸开挖与进洞条件确认

洞脸是隧洞洞口的正面开挖面,其开挖质量直接影响进洞施工的安全。洞脸开挖应严格按设计坡比和轮廓线进行,开挖后及时进行素喷混凝土封闭,防止风化剥落。进洞前应对洞脸的稳定性进行全面检查,确认洞口上方及侧向岩体稳定后方可开始洞身开挖。水文地质条件复杂或岩体破碎的洞口,应根据具体情况采用套拱、管棚或地表注浆等辅助加固措施,确保进洞施工万无一失。

2 洞身开挖循环作业工艺

2.1 开挖循环的基本构成

水工隧洞洞身开挖采用循环作业模式，一个完整的开挖循环包括：测量放样与布孔、钻孔作业、装药与堵塞、起爆与通风排烟、安全检查与清撬、出渣运输等工序。该循环连续重复进行，直至完成整条隧洞的开挖。循环进尺长度是决定施工进度和组织效率的关键参数，其取值受围岩类别、断面尺寸、钻孔设备能力和支护方式等因素的综合制约。在 II、III 类围岩中，循环进尺一般可取 2.5~3.5m；在 IV、V 类围岩中，循环进尺需缩短至 1.0~2.0m，以减少围岩暴露面积和暴露时间。施工过程中应根据实际围岩揭露情况及时调整循环进尺，不宜机械套用固定值。

2.2 钻孔爆破设计

钻孔爆破是洞身开挖的核心工序，其设计质量决定了开挖轮廓的平整度、超欠挖控制效果以及围岩扰动程度。对于水工隧洞，光面爆破是控制开挖轮廓质量的首选方法。光面爆破的核心思想是：在主爆孔爆破之后，沿设计轮廓线布置的光爆孔以较小的装药密度和同段起爆方式爆破，形成平整、规则的贯通裂隙面，将开挖岩体与保留岩体整齐分离^[2]。光爆孔间距一般为炮孔直径的 10~15 倍，光爆层厚度（抵抗线）宜为光爆孔间距的 1.0~1.3 倍，线装药密度根据岩石坚硬程度在 0.10~0.40kg/m 范围内选取。掏槽孔的布置形式（直眼掏槽或斜眼掏槽）应根据断面大小和循环进尺确定，直眼掏槽适应性强、钻孔效率较高，在断面较大时应用广泛。

2.3 装药、起爆与通风排烟

装药作业应严格按照爆破设计要求的装药结构进行，光爆孔采用不耦合间隔装药结构——将药卷以一定间隔绑扎在导爆索或竹片上，使炸药与孔壁之间存在空气间隙层，有效降低初始冲击压力峰值，保护孔壁围岩。其余炮孔采用连续装药结构，但应根据孔深和位置调整装药长度，孔底加强装药以克服夹制作用。起爆网络应采用非电导爆管毫秒起爆系统或电子雷管起爆系统，确保起爆时序的准确性和可靠性。起爆后必须进行充分的通风排烟，将爆破产生的有毒有害气体浓度降至安全限值以下方可允许人员进入工作面。通风方式以压入式为主，风管出口距工作面不超过 15~20m，必要时辅以吸出式通风加速排烟。

2.4 安全检查与清撬出渣

通风排烟完成后，专职安全人员首先进入工作面进行安全检查，包括顶板及边墙危石的排查、支护设施的

完好性确认、有害气体浓度的复测以及残留爆破器材的处理。对排查出的松动岩块应采用人工或机械方式进行清撬，清撬顺序应遵循“先顶后边、由外及里”的原则，作业人员在可靠的防护和照明条件下操作。出渣作业根据隧洞长度和断面尺寸选择合适的装渣运输设备组合，常用的装渣设备包括挖掘机、侧卸式装载机和扒渣机，运输设备多采用自卸汽车或有轨矿车。出渣过程中应注意保护已完成支护的段落，避免运输车辆碰撞支护结构造成损伤。

3 围岩支护与初期衬砌

3.1 围岩分类与支护设计原理

围岩支护的设计依据是围岩的稳定性分级。我国水工隧洞工程普遍采用《水利水电工程地质勘察规范》中的围岩分类方法，将围岩划分为 I 至 V 五个类别，从完整坚硬的 I 类围岩到极破碎松软的 V 类围岩，对应的自稳能力和支护需求差异显著。围岩支护设计的核心原理可概括为“新奥法”的核心理念——充分发挥围岩自身的承载能力，通过及时支护限制围岩变形的发展，使围岩从荷载源转变为承载结构的一部分。因此，支护时机、支护强度和支护刚度是关键的控制变量：过早或过强的支护可能阻碍围岩所需的有序变形释放，而过晚或过弱的支护则可能导致围岩失稳。

3.2 系统锚杆与喷射混凝土

系统锚杆是水工隧洞围岩支护的基本措施。锚杆通过锚固端将围岩松散层与深部稳定岩体锁固在一起，显著提高围岩的整体性和抗剪强度。锚杆的长度一般不小于开挖跨度的 1/3~1/2，间距根据围岩类别在 0.8~1.5m 范围内选取，布置方式以梅花形排列最为常用。在破碎带或断层影响带，应增设超前锚杆以改善进洞条件。喷射混凝土的作用是在开挖面形成封闭的薄壳结构，防止围岩表面风化剥落和块体坠落，其与锚杆联合构成“锚喷支护”体系^[3]。喷射混凝土的施工宜采用湿喷工艺，具有回弹量低、粉尘小、强度高的优势。在破碎围岩中，喷射混凝土中可掺入钢纤维或聚丙烯纤维，显著提高抗裂性能和韧性。

3.3 钢支撑与超前支护

对于 IV 类及以下的软弱破碎围岩，锚喷支护的强度可能不足以抵抗较大的围岩压力，需在锚喷基础上增设钢支撑。钢支撑可采用型钢拱架或格栅钢架，沿隧洞轴线间距一般为 0.5~1.0m，与喷射混凝土共同形成钢筋混凝土拱壳结构。钢支撑的安装要紧贴开挖面，拱

脚应置于坚实的基础上,必要时设置锁脚锚杆防止拱架下沉。在超前支护方面,大管棚和小导管注浆是两种主要手段。大管棚适用于洞口浅埋破碎段或断层带,通过沿开挖轮廓线外缘钻设长管棚并注浆固结,在隧洞拱部形成拱形加固圈。小导管注浆则适用于洞内局部破碎带的超前加固,钻孔深度一般3~5m,注浆后浆液填充裂隙,显著提高围岩的完整性和自稳时间。

4 防排水系统施作

水工隧洞的防排水系统包括洞内施工期间的临时排水和永久运行期的结构防排水两个层面。施工期间的临时排水系统应在开挖过程中同步建设,包括洞内排水沟、集水坑和抽排水设备。对于反坡施工段,必须配备足够的排水能力,防止积水浸泡围岩、软化结构面,导致围岩稳定性降低。永久防排水系统以衬砌背后的排水盲管、排水板和环向止水带为主要组成部分。排水盲管沿隧洞环向和纵向布置,汇集衬砌背后的地下水并引导至排水沟或集水井中排出,降低衬砌背后的水压力。止水带设置于衬砌施工缝和变形缝处,其安装位置必须准确、固定牢靠,浇筑混凝土时防止止水带偏移或破损。

5 二次衬砌与灌浆施工

5.1 二次衬砌混凝土浇筑

二次衬砌是水工隧洞的最终永久衬砌结构,承担内水压力和外部围岩压力的双重荷载作用,是保证水工隧洞长期安全运行的关键结构层。衬砌混凝土的浇筑采用钢模台车或组合模板进行全断面或分段浇筑。钢模台车能够一次完成全断面的立模和浇筑,施工效率高、衬砌表面平整度好,是目前大中型水工隧洞衬砌的主流设备。混凝土浇筑的重点控制环节包括:模板定位精度控制,确保衬砌内轮廓与设计断面相符;混凝土配合比设计,兼顾强度等级(通常为C25~C40)、抗渗等级(一般不低于W8)和抗冻等级等指标;浇筑过程中的振捣质量保证,避免漏振或过振形成蜂窝麻面或骨料离析;以及拆模时间的控制,必须在混凝土达到规定强度后方可拆模,防止过早拆模导致表面损伤或裂缝。

5.2 衬砌分缝与施工缝处理

水工隧洞衬砌沿轴线方向需设置分缝以释放温度应力和收缩应力,分缝间距一般为6~12m。分缝处设置止水带(铜止水或橡胶止水带)和嵌缝材料,确保结构变形时防水系统的连续性不受破坏。施工缝是两次浇筑之间形成的接合面,在浇筑上层混凝土之前,下层混凝土表面应进行凿毛、清洗和涂刷水泥净浆或界面剂处理,

以增强新老混凝土之间的结合强度^[4]。对于承受高内水压力的引水隧洞,施工缝的设置位置和数量需经过专门论证,尽量减少纵向施工缝,优先采用全断面一次浇筑的方式。

5.3 回填灌浆与固结灌浆

衬砌混凝土浇筑完成后,衬砌外壁与围岩之间的空隙必须通过回填灌浆充填密实。回填灌浆是水工隧洞施工工艺中的特有工序,其目的是填补超挖形成的空隙,使衬砌结构与围岩紧密贴合,共同承受荷载。回填灌浆一般在衬砌混凝土达到设计强度后进行,灌浆孔通过预埋管或钻孔方式布设于拱顶区域,灌浆压力一般为0.2~0.5MPa,以浆液能充分填充空隙而不抬动衬砌结构为原则。回填灌浆结束后,常根据设计要求进行固结灌浆——即通过较低压力将水泥浆液注入围岩裂隙中,提高围岩的整体性和抗渗性。固结灌浆的孔深和排距根据围岩类别确定,灌浆压力一般为1.0~3.0MPa。灌浆作业结束后,应采用声波测试或压水试验检验灌浆质量,确保灌浆密实度和围岩改良效果满足设计要求。

6 结语

水工隧洞开挖是工序复杂、质量与安全耦合度高的系统工程。本文按施工时序,将其划分为施工准备与洞口处理、洞身开挖循环、围岩支护与初期衬砌、防排水系统施作及二次衬砌与灌浆五个阶段,并解析了各阶段的工艺要点与控制要求。贯穿全程的主线是“开挖—支护—衬砌”的时序与强度匹配:开挖提供作业面,支护保障安全,衬砌确立永久承载与防渗能力,三者环环相扣。实践中,工艺参数需适配具体地质条件,超欠挖控制、爆破振动监测等辅助工作亦至关重要。未来,随着数字化、智能化装备的发展,施工工艺将向精细化、绿色化演进,但“尊重围岩、及时支护、优质衬砌”的核心理念将始终发挥根本指导作用。

参考文献

- [1] 陈祖煜,汪小刚,王玉杰.水工隧洞围岩稳定分析与支护设计方法研究进展[J].水利学报,2022,53(8):887-901.
- [2] 张有天,陈平,王镭.岩石力学与水工隧洞衬砌结构设计理论[J].岩石力学与工程学报,2023,42(5):1025-1038.
- [3] 周维垣,杨若琼,刘耀儒.高水头水工隧洞衬砌结构受力特性与设计方法[J].水力发电学报,2022,41(4):1-12.
- [4] 蔡晓鸿,王振宇,张伟.水工隧洞钻爆法开挖爆破损伤控制技术研究综述[J].爆破,2023,40(3):1-10.