

水电站引水隧洞施工全过程技术管理要点研究

杨国亮 杨万泽

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：水电站引水隧洞是水利发电工程的核心输水建筑物，具有埋深大、地质条件复杂、施工空间受限、隐蔽工程多等特点，其施工质量直接决定电站运行安全与发电效益。本文系统梳理了引水隧洞的功能结构与施工工艺流程，深入分析了复杂地质条件下的施工难点与技术管理核心目标，围绕施工准备、开挖、支护、衬砌等关键工序提炼了全过程技术要点，并针对当前前期准备不充分、开挖支护管控不严、衬砌灌浆质量缺陷等突出问题，从强化技术策划、精细化开挖爆破与支护时效管理、严控衬砌灌浆工艺质量三个方面提出了优化管理策略，为引水隧洞施工技术管理提供系统性的操作指引。

关键词：水电站；引水隧洞；施工技术管理

引言：引水隧洞是水电站将上游来水输送至发电厂房的关键通道，其施工穿越复杂地质条件，面临断层破碎带、高地应力岩爆、高压涌水等不良地质挑战，施工技术难度大、安全风险高，是全工程建设的关键性环节。钻爆法开挖、锚喷支护、混凝土衬砌等工序环环相扣，前道工序的质量直接决定后道工序的施工条件，对全过程技术管理的系统性和精细化提出了极高要求。基于引水隧洞施工实际，系统梳理各阶段技术管理要点，诊断薄弱环节并提出优化策略，以期同类工程施工技术管理提供参考。

1 引水隧洞施工特点与管理核心目标

1.1 引水隧洞功能、结构形式与施工工艺流程

引水隧洞按水流条件分为有压隧洞和无压隧洞，断面形式以圆形、马蹄形和城门洞形为主，圆形断面受力最优。施工工艺流程包括施工准备、洞口明挖及进洞、洞身钻爆开挖、出渣运输、初期支护、围岩监测反馈、二次衬砌、防排水系统施工、灌浆及竣工验收。各工序环环相扣，前道工序质量直接影响后道工序，要求全过程技术管理系统完整、前后衔接。洞身开挖是施工核心环节，其进度制约后续所有工序推进节奏，是工期控制的关键线路。

1.2 复杂地质条件下施工核心难点

引水隧洞施工难点集中在四方面。地质条件不确定性——隧洞可能穿越断层破碎带、岩溶区、高地应力区和高压含水层，施工中遭遇的问题往往超出设计预判，要求现场具备快速应变能力。长距离独头掘进导致通风排烟困难、运输线路长、洞内环境恶劣，施工效

率受制约。支护与开挖的时效性矛盾突出——围岩暴露过长易失稳，而支护作业占用开挖循环时间，须精准平衡。衬砌质量控制难度大——单面模板顶部封闭浇筑，振捣困难，裂缝和渗漏水问题频发，对工艺和管控要求极高^[1]。

1.3 施工技术管理的核心目标

施工技术管理核心目标是实现安全、质量、进度三者协调统一。安全方面，确保围岩稳定和作业人员安全，建立“超前预报—动态设计—信息化施工”保障体系。质量方面，确保开挖轮廓精准、支护牢固、衬砌密实、防排水有效，满足设计使用年限要求。进度方面，通过科学方案和合理工序衔接保障工期，避免因准备不足或管控失当导致延误。三大目标相互制约——过分追求进度可能牺牲质量安全，过度保守则推高成本延误工期，技术管理核心任务是在动态施工中通过精准决策寻找最优平衡点。

2 引水隧洞施工全过程核心技术要点

2.1 施工准备阶段技术管理要点

施工准备阶段是技术管理的基础，直接决定后续施工能否顺利开展。地质勘察复核方面，应在设计地质资料基础上开展施工地质补充调查，采用地质雷达、TSP超前预报、超前钻探等手段查明掌子面前方地质条件，为动态设计提供依据。技术方案编审方面，编制总体施工组织设计及钻爆、支护、通风、排水等专项施工方案，关键方案须经专家评审后方可实施。测量控制网建立方面，布设洞口及洞内高精度施工测量控制网，贯通误差按规范要求进行预估和分配，确保隧洞贯通精度满

足设计要求。技术交底方面,实行分级交底制度——设计单位向施工单位进行设计交底,施工单位技术负责人向管理人员进行方案交底,管理人员向一线作业班组进行工序交底,确保每个岗位都清楚“做什么、怎么做、做到什么标准”。

2.2 隧洞开挖施工技术要点

开挖是引水隧洞施工的核心工序,直接决定后续支护和衬砌的工作条件。钻爆参数设计应根据围岩类别进行差异化设计,合理确定炮眼直径、深度、间距、装药量和起爆顺序,周边眼采用光面爆破技术,炮眼间距控制在 30~50cm,装药密度适当减小,确保爆破后围岩壁面平整、超欠挖控制在规范允许范围内(超挖量 $\leq 15\text{cm}$,不允许欠挖)。分层开挖控制方面,II、III类围岩可采用全断面开挖,IV、V类围岩应采用台阶法或分部开挖法,减少对围岩的一次性扰动。每循环开挖完成后须进行围岩观察和描述,记录岩性变化、节理裂隙发育情况和地下水出露状况,及时反馈设计单位判断是否需要调整支护参数。出渣作业应合理配置装渣和运输设备,有轨运输需保证轨道铺设质量和运输调度安全,无轨运输需控制洞内车速和路面维护^[2]。

2.3 锚喷支护施工技术要点

初期支护必须紧跟开挖作业面,落实“随挖随支”原则,IV、V类围岩须在开挖后 4~8 小时内完成初期支护。围岩清理方面,每循环爆破后及时进行排险作业,清理顶拱和边墙的危石、悬石,确认掌子面及已开挖段围岩稳定后方可进行支护作业。锚杆施工应确保孔位偏差不超过 $\pm 15\text{cm}$,孔深偏差不超过 $\pm 5\text{cm}$,角度符合设计要求;锚固剂须饱满密实,锚固力通过拉拔试验检测,检测频率为锚杆总数的 1%~3%,锚固力不低于设计值的 90%。钢筋网铺设应紧贴岩面,搭接长度不小于一个网格边长,并与锚杆头部焊接牢固。喷射混凝土采用湿喷工艺以减少回弹和粉尘,喷射作业自下而上分段进行,一次喷射厚度控制在 5~8cm,终凝后及时洒水养护 7 天以上。钢拱架安装应确保垂直度偏差不超过 2° ,间距偏差不超过 $\pm 5\text{cm}$,拱架脚座置于牢固基岩上,纵向连接筋焊接牢固,形成整体受力结构。

2.4 混凝土衬砌施工技术要点

二次衬砌是保证隧洞结构稳定和长期防渗性能的关键。钢筋绑扎方面,确保钢筋规格、间距、保护层厚度符合设计要求,主筋接头采用机械连接或焊接,接头错开布置,同一截面接头面积不超过主筋总面积的 50%。模板台车就位后须精确校核中线和高程,偏差控制在

$\pm 5\text{mm}$ 以内,确保衬砌厚度均匀满足设计厚度。混凝土浇筑采用对称分层、连续灌注方式,左右两侧高差不超过 50cm,分层厚度不超过振捣器有效作用深度(通常为 30~50cm),入模温度控制在 5~30℃,夏季施工须采取降温措施防止温度裂缝。使用附着式振捣器与插入式振捣器联合振捣,确保顶拱和边墙混凝土密实、无空洞。拆模时间根据同条件养护试块强度确定,不早于设计强度的 70%或规范要求的具体龄期,拆模后及时进行洒水或喷雾养护,养护期不少于 14 天,有特殊要求的部位不少于 28 天。

3 当前引水隧洞施工技术管理存在的问题

3.1 前期技术准备不充分

部分引水隧洞项目对施工前期的技术准备工作重视不够,为后续施工埋下隐患。地质勘察复核方面,未充分开展施工地质补充调查和超前预报工作,对设计地质资料与现场实际的偏差缺乏有效验证,不良地质条件在开挖临近时才被发现,导致施工陷入被动应对。技术方案编制方面,施工组织设计和专项施工方案流于形式,爆破参数、支护参数等关键指标照搬类似工程模板,未结合本工程围岩特性、水文地质条件进行针对性设计,方案与实际施工脱节^[3]。技术交底方面存在层级缺失,管理人员虽了解方案内容但一线作业班组仅得到口头简单交代,作业人员对工艺标准和操作要领理解不到位,“技术先行”原则未能真正落实,施工方案的指导作用大打折扣。

3.2 开挖支护质量管控不严

开挖与支护是引水隧洞施工中最容易出现质量问题的环节。开挖方面,爆破参数未根据围岩变化及时调整,周边眼间距偏大或装药量控制不当,造成超挖严重(超挖量超过 15cm 甚至更大)或局部欠挖,超挖不仅增加了后续衬砌的混凝土用量和衬砌厚度负担,更严重的是破坏了围岩的完整性,削弱了围岩自承能力。支护方面,问题更为突出——锚杆角度偏差大、锚固剂不饱满、锚固力不达标的情况时有发生;喷射混凝土厚度不均匀,部分区域厚度不足设计值的 2/3,且强度检测频率不足,回弹料被二次利用严重影响强度;钢拱架连接不牢固,拱脚悬空或坐落在虚渣上。支护滞后于开挖的问题普遍存在,围岩暴露时间远超规范要求,变形和失稳风险显著升高,初期支护的质量缺陷为后续衬砌安全留下了隐患。

3.3 衬砌与灌浆施工质量缺陷

衬砌与灌浆是隧洞施工的最后两道关键工序,其质

量缺陷直接威胁运行安全。衬砌施工中,钢筋保护层厚度偏差大、混凝土振捣不密实导致的蜂窝麻面和孔洞、养护不到位引起的早期温度裂缝等问题频发,衬砌背后空洞是影响结构安全最严重的隐蔽缺陷——由于顶拱浇筑时排气不畅或混凝土收缩导致衬砌与围岩之间存在空隙,该空隙在运行期可能形成渗水通道并加剧围岩风化。灌浆施工方面,回填灌浆孔位布置随意、灌浆压力控制不稳、结束标准执行不严,防渗效果无法保证;固结灌浆升压速度过快导致围岩抬动或衬砌裂缝。这些问题如不在施工阶段彻底处理,运行后将面临反复渗漏维修的被动局面,不仅增加运维成本,更影响电站安全稳定运行。

4 引水隧洞全过程施工技术管理优化策略

4.1 强化前期技术策划与方案管理

建立“勘察复核—方案编制—专家评审—分级交底”的标准化技术策划流程。开工前开展系统的施工地质补充调查,综合运用地质雷达、TSP超前预报和超前钻探等手段查明前方地质条件,编制地质预测报告作为方案设计的依据。施工组织设计和专项施工方案须结合本工程围岩分级、地下水条件和施工设备能力进行差异化设计,爆破参数、支护参数等核心指标应通过类比工程经验与理论计算相结合的方式确定。关键方案须经不少于5人的专家评审通过后方可实施,评审意见逐条落实并形成闭环。技术交底实行“一工序一交底”制度,每道新工序开工前由技术负责人向管理人员和作业班组进行书面交底,交底内容包括工艺标准、质量控制要点和安全注意事项,交底记录由所有参加人员签字确认并归档备查。

4.2 精细化开挖爆破与支护时效管理

从爆破动态控制和支护时效性两方面强化管理,实行“一炮一设计、一炮一分析”的动态爆破管理制度——每循环爆破前根据掌子面围岩变化调整炮眼布置和装药参数,爆破后对半孔率(硬岩 $\geq 80\%$ 、软岩 $\geq 50\%$)、超欠挖量和围岩破坏深度进行系统评估,分析结果指导下一个循环设计优化,形成“爆破—评估—优化”的动态循环。推行三维激光扫描技术进行超欠挖检测,超挖量超过规范允许值的部位须分析原因并采取补救措施,超欠挖指标纳入工序考核与绩效挂钩。支护时效方面,将支护完成时间纳入施工进度考核指标,IV、V类围岩开挖后须在4小时内完成初喷封闭、8小时内完成系统支护;锚杆施工采用锚杆钻机确保角度精度,锚固

力通过拉拔试验逐批次检测;喷射混凝土强度采用喷大板法或回弹法检测,检测频次每班不少于1组,检测不合格的及时返工处理^[4]。

4.3 严控衬砌与灌浆施工工艺质量

推行衬砌首件验收制度——首仓衬砌施工完成后,由建设、设计、施工、监理四方进行联合验收,全面检查钢筋绑扎、模板安装、混凝土外观和厚度等各项指标,验收合格后方可展开大面积施工,验收标准作为后续各仓的统一参照。混凝土浇筑过程实施全程旁站监理,重点监控入模温度(控制在 $5\sim 30^{\circ}\text{C}$)、分层厚度(不超过50cm)和振捣质量,浇筑记录须注明浇筑时间、温度、塌落度等参数。灌浆施工配备自动记录仪实时采集灌浆压力、流量和浆液密度数据,压力表精度不低于0.4级,确保灌浆过程可追溯、可核查。建立衬砌背后空洞专项检测制度,采用地质雷达或锤击法逐仓检测,发现空洞面积超过规范允许值的须进行钻孔补灌处理。渗漏水问题实行“一缝一档”台账管理,查明原因、制定方案、限期整改、复检验证,确保交付前所有渗漏点处理合格,形成完整的质量闭环管理体系。

结束语

引水隧洞施工技术管理是一项贯穿施工全过程的系统性工作,其管理水平直接决定隧洞工程的结构安全与运行寿命。本文从引水隧洞施工特点与管理核心目标出发,系统梳理了施工准备、开挖、支护、衬砌等关键工序的技术管理要点,深入剖析了前期技术准备不充分、开挖支护管控不严、衬砌灌浆质量缺陷等突出问题,并从强化前期技术策划、精细化开挖爆破与支护时效管理、严控衬砌灌浆工艺质量三个方面提出了优化策略。唯有坚持技术先行、过程严管、持续改进的管理理念,方能有效应对复杂地质挑战,确保引水隧洞工程施工安全与质量目标的全面实现。

参考文献

- [1] 骆科军. 水电站引水隧洞施工支洞堵头封堵防渗漏施工技术应用分析[J]. 科技资讯, 2026, 24(1): 155-157.
- [2] 李俊美. 某水电站引水隧洞施工与运行期的稳定性模拟分析[J]. 工程建设与设计, 2023(14): 55-57.
- [3] 唐洪应, 南海江, 吴桃, 等. TRT技术在绰斯甲水电站引水隧洞施工中的应用[J]. 四川水力发电, 2025, 44(3): 1-3, 18.
- [4] 王祥峰, 马斌, 薛林丽, 等. 硬梁包水电站引水隧洞施工支洞布置研究[J]. 四川水力发电, 2023, 42(1): 105-108.