

水利工程隧洞施工关键技术探讨

姚俊豪

新疆兵团水利水电工程集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 水利工程隧洞施工涉及开挖、支护、防排水及通风防尘等关键技术。开挖需根据围岩条件选择钻爆或机械掘进方式,严格控制断面精度;支护采用喷射混凝土、锚杆及钢拱架组合体系,二次衬砌注重模板安装与混凝土浇筑质量;防排水通过防水层铺设与排水系统布置实现,配合效果检测确保工程质量;通风防尘采用压入式通风与多重降尘措施保障作业环境安全。各项技术协同应用,可有效提升隧洞施工质量与安全水平。

关键词: 水利工程;隧洞施工;关键技术

引言: 水利工程隧洞施工技术复杂,开挖、支护、防排水及通风防尘是影响工程质量与安全的关键环节。开挖需依据围岩条件选择钻爆或机械掘进方式,严格控制断面精度;支护采用喷射混凝土、锚杆、钢拱架与二次衬砌组合体系,确保结构稳定;防排水通过防水层铺设与排水系统布设实现有效截排;通风防尘采用压入式通风与多重降尘措施保障作业环境。系统探讨各关键技术要点,对提升隧洞施工质量、安全水平及工程耐久性具有重要意义。

1 水利工程隧洞开挖关键技术

1.1 隧洞开挖方式选择与应用

钻爆开挖技术要点在于合理布置炮孔位置及深度,严格控制单孔装药量与起爆顺序,采用光面爆破等控制爆破方法减少对围岩的扰动,从而控制超挖与欠挖,提升洞壁成形质量。施工中需根据围岩类别动态调整爆破参数,完整性好的岩体可适当增强爆破能量,破碎或软弱岩体则需降低爆破强度并加强支护跟进。机械掘进开挖技术要点包括根据岩石硬度及磨蚀性选择合适的掘进机或铣挖机类型与刀具配置,实时监测刀具磨损状态并控制推进速度及刀盘转速,防止卡机和偏挖。机械掘进对围岩扰动小,洞壁平整,施工环境可控,需配套高效通风与除尘系统,适用于中硬岩层及软弱围岩的隧洞开挖作业。

1.2 开挖断面控制技术

断面尺寸精度控制依赖于高精度测量放样,对隧洞轴线和高程进行反复校核,每循环开挖前按照设计断面轮廓线严格限定进尺长度和开挖边界位置,避免局部超挖或欠挖。钻爆施工通过调整周边孔间距与装药参数控制爆破面形态,机械掘进依靠设备导向系统和自动轮廓控制装置实时调整切割臂位置。每循环开挖后及时检测断面,发现偏差立即分析原因并修正施工参数。开挖平

整度控制措施包括合理布置炮孔或切割路径,使开挖面形成均匀起伏形态。钻爆施工中采用小直径药卷和间隔装药方式降低爆破对炮孔壁的局部破坏,机械掘进控制切割头移动步距和深度,避免产生明显台阶或沟槽,对局部凸起或欠挖部位采用人工修凿或小型机械补挖处理,确保洞壁表面平整。

1.3 不良地质段开挖技术

软弱围岩段开挖控制的关键在于减少围岩扰动并缩短暴露时间,施工中采用短进尺、弱爆破或机械铣挖方式,严格控制每循环开挖长度,开挖后立即进行初期支护封闭成环。对于极软岩或断层破碎带,可先采取超前管棚或注浆加固等预处理措施后再行开挖,以提升围岩整体性。施工过程中加强围岩变形监测,根据监测数据动态调整开挖进尺与支护参数,必要时保留核心土或采用分步开挖方法防止掌子面失稳。涌水突泥段开挖处置技术强调超前探测与预处理,施工前开展超前地质预报查明含水构造及泥质填充物分布位置与压力状态^[1]。针对涌水风险段采用超前帷幕注浆或径向注浆封堵地下水,降低地层渗透性后再行开挖,突泥段先对填充物进行置换或固化处理。开挖时保持短进尺慢推进,配备大能力排水设备及时排除洞内积水,加强初期支护的封闭性与抗水压能力,确保开挖面稳定。

2 水利工程隧洞支护关键技术

2.1 初期支护技术

喷射混凝土支护技术要点在于合理控制喷射压力、喷射距离及喷射角度,使混凝土紧密粘结于围岩表面形成密实且具有较高强度的保护层。施工前应对受喷面清理干净,清除松动岩块及粉尘杂物。施工中调整混凝土配合比与速凝剂掺量,将回弹率控制在规定范围内,喷射作业自下而上分层进行,每层厚度适当,待前一层初凝后方可喷射下一层,避免产生脱落或空鼓现象。渗水

地段应先埋设排水管引水后再喷射混凝土,保证混凝土与岩面的粘结效果。锚杆及钢拱架支护技术应用要求锚杆的孔位、孔深及角度符合设计要求,成孔后应清孔除去岩屑,杆体安装后施加适当预应力,通过垫板紧贴岩面传递支护力。钢拱架安装应确保拱脚稳固置于坚实基面上,拱架之间设置纵向连接筋增强整体性,拱架背部与围岩间的空隙须用混凝土填充密实,使锚杆、钢拱架与喷射混凝土共同形成承载体系,及时封闭围岩防止变形松弛。

2.2 二次衬砌技术

衬砌模板安装与固定技术的重点在于模板定位精确、接缝严密以及支撑系统稳固可靠。模板安装前应清理基面并涂刷脱模剂,按照设计轴线和高程逐块进行拼装,相邻模板之间的接缝处设置密封条防止漏浆。模板支撑体系需具备足够刚度与稳定性,支撑间距经过计算确定,防止浇筑过程中模板发生位移或变形。模板安装完成后应复核断面尺寸及净空限界,确认无误后方可浇筑混凝土。衬砌混凝土浇筑与养护技术要求混凝土分层对称浇筑,严格控制每层浇筑厚度与时间间隔,避免产生冷缝。浇筑过程中采用插入式振捣与附着式振捣相结合的方式排出混凝土内部气泡,确保混凝土达到密实状态^[2]。混凝土初凝后及时进行保湿养护,保持衬砌表面持续湿润,养护时间满足强度增长要求,防止干缩裂缝产生,确保衬砌结构的整体质量与耐久性能。

2.3 支护质量控制技术

支护强度检测技术采用现场取样或无损检测方法对喷射混凝土及二次衬砌混凝土的抗压强度进行测定。喷射混凝土可在施工过程中制作同条件养护试件,或通过钻芯取样方式获取强度指标。锚杆拉拔力检测按一定比例随机选取锚杆进行拉拔试验,检验锚固长度及锚固质量是否满足设计要求。钢拱架安装质量检测包括拱架间距、垂直度及连接牢固性等内容的检查,确认所有连接螺栓紧固到位。支护结构稳定性监测技术在围岩及支护结构内部布设监测仪器,持续采集变形、压力及内力数据。监测项目包括隧洞周边位移、拱顶下沉及锚杆轴力等,监测频率根据施工进度及围岩稳定状态进行动态调整。监测数据应及时分析处理,绘制变化曲线判断围岩收敛趋势,当发现异常变化时迅速查明原因并采取补强措施,确保支护结构长期稳定。

3 水利工程隧洞防排水关键技术

3.1 隧洞防水技术

防水层铺设技术要点在于基面处理、材料铺设与搭接质量的控制。铺设前应对隧洞初期支护表面进行彻底

平整处理,清除所有尖锐凸起物及松散附着物,对明显渗水点采取注浆封堵或引排措施,使基面达到基本干燥状态。防水材料按设计位置展开并以适当间距固定于基面,相邻两幅防水层之间形成足够宽度的搭接,采用热熔焊接或专用粘结剂使搭接缝严密可靠,不得出现漏焊、翘边或空鼓等缺陷。施工缝及变形缝防水处理技术针对不同接缝类型采用相应的构造措施。施工缝处可设置止水条或遇水膨胀止水胶,浇筑混凝土前对旧混凝土表面进行凿毛处理并清理干净,确保新旧混凝土结合紧密^[2]。变形缝因受温度变化或不均匀沉降影响易发生较大位移,设置可适应变形的止水带结构,止水带应居中安装牢固,浇筑混凝土时避免止水带发生偏移、扭转或卷曲,确保其在接缝两侧有效锚固,形成连续封闭且能适应变形的完整防水体系。

3.2 隧洞排水技术

排水系统布置技术要求根据隧洞涌水量预测结果及围岩渗水分布条件,合理确定排水沟、排水孔及集水坑的位置、间距与断面尺寸。衬砌背后应设置环向及纵向排水管,环向排水管用于拦截围岩渗水,纵向排水管用于汇集环向排水管收集的水流,最终引入侧沟或中心排水沟排出洞外。排水系统的纵向坡度应保证水流顺畅,避免出现反坡积水现象。排水管接头部位须进行严格密封处理,防止泥沙渗入管内造成堵塞。涌水排水处置技术针对开挖面或衬砌背后出现的突发涌水情况,配备足够能力的排水设备,包括主排水泵与备用排水泵,排水管道管径与排水能力须满足最大涌水量要求^[4]。隧道内设置多级排水站时,各级泵站之间的水位应通过控制系统协调联动,避免出现溢流或空转情况。对于长距离隧洞施工,还需设置多级沉淀池,使含泥沙水体经充分沉淀后再排出,减少排水系统淤积磨损,保证排水系统长期稳定高效运行。

3.3 防排水效果检测技术

防排水效果检测技术通过多种检测手段综合评定防水层施工质量、排水系统功能状态及衬砌结构自防水性能。防水层完整性检测可采用非破坏性检测方法,对防水层搭接缝和固定点进行逐段密封性检查,判断是否存在漏气、剥离或破损部位,对发现缺陷及时标记并修复。排水系统检测主要检查排水沟槽断面尺寸及排水管道是否通畅,通过在管段内注水或通气的方式检验排水能力是否达到设计要求,同时检查集水坑及沉淀池淤积情况。对于衬砌结构自身的防水性能,可选取代表性区段进行渗水压力及渗水量的现场测定,评估混凝土抗渗等级是否满足规定要求。检测过程中发现渗漏水点时,准确记

录渗漏点的位置、渗漏形态及渗漏程度,并分类确定相应的处置方案。对于轻微渗水,可采取表面封堵或局部注浆处理;对于明显涌水,则需补充系统注浆或增设排水设施。所有检测数据应系统整理归档,作为防排水工程验收及后续维护管理的重要依据。

4 水利工程隧洞施工通风与防尘关键技术

4.1 施工通风技术

通风系统布置与优化要求根据隧洞长度、断面尺寸、施工强度及内燃设备使用情况,合理确定通风方式、风机选型及风管直径。压入式通风应将风机设置于洞外新鲜空气处,风管末端紧跟工作面,保证新鲜空气有效送至开挖区域。抽出式或混合式通风适用于长距离隧洞,需在适当位置设置中间风站接力送风。风管安装应平顺顺直,接头处严密不漏风,风管悬挂固定牢固且不影响运输通行。通风系统运行过程中应根据掘进距离延长及时调整风管长度或增设接力风机,降低沿程风阻。通风效果控制与监测需在工作面附近及主要作业区域设置风速及空气质量监测点,持续检测氧气含量、有害气体浓度及粉尘浓度^[5]。当监测数值超出允许范围时,应增加通风量或调整通风布局,确保作业面空气中有害物质浓度低于限值,保障施工人员健康与作业安全。

4.2 施工防尘技术

粉尘产生控制措施重点在于从源头上减少粉尘生成量。钻爆作业应采用湿式凿岩方法,钻孔过程中持续向孔内注水,使岩屑湿润沉降。爆破后及时进行喷雾洒水降尘,在装渣前对爆堆充分淋水湿润。机械掘进过程中,在切割头附近设置喷雾装置,利用高压水雾捕捉所产生的粉尘。出渣运输环节应在装渣点和卸渣点设置喷淋设施,

运输道路保持湿润状态,防止车辆行驶扬尘。粉尘净化与排放控制技术包括设置除尘设备对含尘空气进行集中处理。长距离掘进时可在适当位置安装干式或湿式除尘器,将工作面含尘空气吸入净化后再排入洞内循环使用或直接排出洞外。对于钻爆法施工,爆破后应强制通风并配合水幕帘或化学抑尘剂提高降尘效果。作业人员应佩戴防尘口罩作为个体防护,综合运用通风排尘、喷雾降尘及净化除尘等多种手段,将作业区域粉尘浓度控制在允许限值以内。

结束语:水利工程隧洞施工是集开挖、支护、防排水及通风防尘于一体的系统性工程。钻爆与机械掘进的合理选择保障了开挖精度,初期支护与二次衬砌组合体系确保了结构稳定,防水层铺设与排水系统布设实现了有效截排,压入式通风与多重降尘措施维护了作业环境安全。各关键技术相互配合、协同推进,是保障隧洞施工质量与安全的核心支撑,对提升水利工程建设水平具有重要实践价值。

参考文献:

- [1]蔡斌.水利工程隧洞开挖施工关键技术探析[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2026(2):102-105.
- [2]刘宝军.水利工程施工中引水隧洞施工技术分析[J].中国厨卫,2026,25(3):214-216.
- [3]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(7):129-131.
- [4]李耀海.水利工程中引水隧洞施工关键技术分析[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(6):137-140.
- [5]宋旭旭.水利工程隧洞开挖施工技术的探讨[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(2):139-142.