

复杂地质条件下深埋引水隧洞开挖支护施工技术优化研究

荆建国

中国水电建设集团十五工程局有限公司第二工程公司 陕西 西安 710016

摘 要: 深埋引水隧洞施工受高地应力、不良地质构造等多重因素制约,开挖与支护环节的稳定性管控一直是地下工程领域的核心难点。本文结合复杂地层下隧洞施工的实际特性,从开挖工艺、支护体系、配套施工机制三个维度展开技术优化分析,针对性破解传统施工模式在深部地层适配性不足的问题,形成一套可动态适配围岩形变规律的开挖支护协同施工方案,为同类深埋引水隧洞工程的现场施工提供实操性技术参考。

关键词: 复杂地质;深埋引水隧洞;开挖支护;施工优化;围岩稳定

引言:水利工程建设逐步向深部地下空间延伸,深埋引水隧洞的建设占比持续提升。这类工程普遍面临高地应力集中、不良地质交错分布、围岩动态形变难以预判等多重挑战,常规浅层隧洞的施工工艺已无法适配深部复杂地层的受力特性。施工过程中频繁出现的岩爆、围岩大变形、支护结构开裂等问题,直接制约工程的施工安全与建设效率。针对复杂地质条件下的施工痛点开展技术优化,对提升深埋引水隧洞建设质量、强化施工全过程稳定性有着重要的现实意义。

1 复杂地质下深埋引水隧洞施工特性分析

1.1 深埋隧洞高地应力施工特性

深埋引水隧洞埋深数值突出,地下岩体长期处于封闭受压环境,地层内部积蓄充足的原始地应力。隧洞开挖作业会彻底打破地层固有的应力平衡状态,促使周边围岩发生大范围应力重分布。硬质围岩区域容易触发岩爆问题,坚硬岩体突然脱落、弹射,直接干扰正常施工作业。软质围岩区域会持续发生塑性蠕变变形,造成隧洞断面收缩、边墙挤压变形等问题。高地应力会持续改造岩体原有结构,让地层原生裂隙不断延展、相互贯通,逐步破坏岩体完整状态^[1]。施工全过程中,洞顶与两侧边墙围岩稳定性持续衰减,传统施工工艺无法匹配此类复杂的岩体变形规律。

1.2 复杂不良地质围岩施工特性

深埋引水隧洞穿越的地下地层构造繁琐,施工区间多分布破碎围岩、软弱夹层、风化变质岩体等不良地质构造。破碎围岩整体结构松散,岩体颗粒粘结强度不足,内部裂隙纵横发育,整体承载与抗扰动能力偏弱。软弱夹层土体质地松软,胶结固结性能较差,施工产生的轻微扰动,都易引发夹层滑移、围岩坍塌等隐患。风化岩体各项物理力学指标大幅衰减,抵抗变形、抵御破坏的性能显著下降。部分隧洞地层暗藏透水、储水构

造,施工扰动会激活水体渗流通道,引发围岩渗水、局部涌水问题,进一步削弱岩体结构强度,增大围岩失稳概率。多种不良地质构造交错分布,大幅增加隧洞地下施工的不可控性。

1.3 深埋引水隧洞开挖支护施工难点

深埋隧洞地处地下封闭空间,地层受力状态复杂多变,开挖作业会直接扰动原始岩体的稳定结构。传统开挖手段会对围岩造成结构性损伤,扩大岩体裂隙的发育范围,让围岩失稳隐患进一步加剧。地下深部作业空间狭窄受限,施工环境恶劣,支护构件的布设、安装精度难以精准把控。完成初期支护施工后,围岩变形不会即刻停止,会长期保持缓慢形变的状态,让支护结构持续承受动态变化的围岩压力。刚性支护形式难以适配围岩的持续性形变,长期受力后容易出现开裂、扭曲、损毁等问题。柔性支护承载性能存在上限,无法有效抵御高地应力带来的强挤压作用,整体施工管控难度显著提升。

1.4 地质条件对隧洞施工工艺的制约机制

地层岩体的强度等级、结构形态,是确定隧洞开挖方式与施工参数的核心依据。质地坚硬、结构完整的岩体,可适配高强度开挖施工方式。结构破碎、质地软弱的岩体,需要严控施工扰动强度,采用低扰动开挖模式。不同地质构造条件,会直接限定支护体系的布设形式与施工先后顺序。岩体完整的常规区段可采用标准化支护工艺,不良地质区段需要调整支护结构层级,优化整体施工流程。地层含水条件会直接左右施工工艺选型,含水地层需要调整施工操作步骤,规避水害问题破坏岩体结构。地质环境的多样化与复杂性,会压缩传统施工工艺的适用场景,各类施工技术都需要结合现场地质条件做出专项优化调整。

2 深埋引水隧洞开挖施工技术优化

2.1 传统隧洞开挖施工工艺短板分析

常规隧洞开挖工艺多套用标准化施工模式,参数设置依据浅层隧洞施工经验确定。这类工艺适配地层条件单一,应对深埋高地应力环境存在明显缺陷。爆破参数固化固定,装药结构、孔网间距未结合深部岩体特性调整,容易造成围岩过度破碎。掘进进尺设置缺乏动态调整空间,开挖节奏无法适配复杂地质的稳定状态。粗放式开挖操作会加重岩体内部损伤,催生大量新生裂隙,降低围岩自身承载能力。单一化的开挖流程排布固化,未针对不良地质区段做出差异化调整,难以应对深部地层多变的受力状态^[2]。

2.2 适配复杂地质的分层分段开挖工艺优化

结合深埋隧洞地质差异性,可采用分层分段开挖模式替代整体开挖模式。依据围岩完整程度、岩体强度差异划分开挖层级,自上而下逐层剥离岩体。坚硬岩体可适当加大单层开挖厚度,破碎软弱岩体需缩减单次开挖体量。沿隧洞纵向划分独立施工区段,单独设定各区段开挖参数与施工节奏。该模式能够分散地层集中应力,削弱开挖扰动对大范围围岩的影响。分层作业可预留充足的围岩应力释放空间,降低瞬时应力集中带来的失稳风险。

2.3 深埋隧洞光面爆破施工参数优化

光面爆破是控制隧洞成型质量的核心手段,深部地层施工需针对性调整爆破参数。结合高地应力岩体特性调整周边孔间距,缩小孔距可提升洞壁平整程度。调整装药集中度与封堵长度,弱化爆破冲击波对周边围岩的冲击破坏。优化掏槽孔布置形式,提升岩体破碎均匀度,减少大块岩体残留。根据岩层软硬程度调整起爆顺序,合理排布爆破时序。精细化的参数设置可以降低爆破对围岩结构的破坏,维持原始岩体的完整状态。

2.4 隧洞开挖围岩扰动控制技术优化

深埋地层岩体敏感度高,开挖扰动会加速裂隙发育与结构劣化。可通过控制单次开挖规模弱化施工扰动强度,减少岩体受力突变问题。采用精细化钻孔作业方式,严控钻孔偏差,避免机械振动持续损伤围岩。针对裂隙发育地层,增设缓冲孔弱化爆破能量传递。通过调控施工强度、作业节奏,延缓围岩应力释放速度。多项技术调整可以有效约束围岩扰动范围,维持隧洞开挖阶段的岩体稳定状态。

2.5 狭小深埋隧洞开挖施工工序优化

深埋隧洞作业空间狭窄,多工序交叉作业容易出现施工混乱、效率偏低的问题。重新梳理开挖作业全流程,剔除冗余施工步骤,理顺掘进、钻孔、清渣各环节衔接关系。调整各工序作业时长与穿插节点,合理分配

狭小空间内的施工资源。针对深部封闭作业环境,优化单次施工循环流程,简化复杂作业步骤。规整后的施工工序可以提升空间利用率,让开挖作业更加规范有序,适配狭小深埋隧洞的施工条件。

3 深埋引水隧洞支护施工技术优化

3.1 常规支护工艺适配性缺陷分析

常规隧洞支护工艺多应用于浅埋、地质条件稳定的工程场景。支护结构设计参数趋于固定,施工模式缺乏针对性调整空间。深部地层高地应力作用下,常规支护结构刚度、强度难以抵御围岩持续形变产生的挤压作用。支护施工时机设置较为固化,无法匹配深埋围岩应力释放节奏。单一的支护结构形式难以应对破碎、风化、含水等多样不良地质条件。传统施工模式对围岩动态形变特性考量不足,结构布设形式难以适配复杂地层的受力变化规律^[3]。

3.2 复杂地质围岩初期支护技术优化

复杂地质区段围岩稳定性差,开挖后短时间内易出现结构失稳问题。依托围岩实际状态调整初期支护施工时机,缩短围岩裸露空置时长。调整喷射混凝土配比与施工厚度,提升混凝土层抗渗、抗变形性能。优化锚杆布设间距与锚固深度,强化浅层围岩的整体性与固结效果。针对松散破碎地层,增设临时支护构件辅助固岩,填补围岩结构缺陷。依托地质差异调整支护施工强度,阻断裂隙持续发育路径,稳固浅层岩体结构。

3.3 深埋隧洞永久支护结构施工工艺优化

永久支护结构承担隧洞长期地层压力,施工质量直接决定工程服役稳定性。结合深埋隧洞受力特点,优化衬砌结构浇筑流程与分层施工方式。严控钢筋布设精度与混凝土浇筑密实度,规避结构内部空隙、开裂等问题。调整衬砌养护时长与养护环境管控标准,提升混凝土结构成型强度。根据不同区段地质状态,微调衬砌结构厚度与构造形式,强化结构整体承载性能。规范深部地下环境的施工操作标准,提升永久支护结构的耐久性与完整性。

3.4 支护结构与围岩协同受力施工优化

隧洞围岩与支护结构可形成整体承载体系,施工方式直接影响受力体系成型质量。调整支护施工时序,适配围岩应力释放进程,让围岩自身承载性能充分发挥。优化支护构件布设方式,缩小结构与围岩间隙,保证应力均匀传递分布。改善支护施工工艺,减少施工操作对成型围岩结构的二次损伤。通过精细化施工调控,平衡围岩形变应力与支护承载应力,构建稳定的整体承载体系。

3.5 高地应力环境下支护施工方式优化

高地应力环境围岩形变持续时间久,支护施工需适配动态地层受力特征。摒弃单一刚性支护施工模式,搭配可缓释应力的支护施工形式。分步开展支护作业,分层承接地层压力,缓解结构瞬时承载负荷。调整支护施工节奏,适配岩体缓慢蠕变的形变规律。优化局部应力集中区段的支护施工方案,强化薄弱位置防护力度,规避结构受压破损问题。

4 隧洞开挖支护配套施工体系优化

4.1 开挖支护施工设备适配优化

深埋引水隧洞地处地下封闭空间,作业断面受限,现场施工条件相对恶劣。市面上通用的大型施工设备体型笨重,机动性能不足,难以适应狭小的隧洞作业环境。常规钻孔设备作业精度有限,成孔规整度较差,难以达到深埋隧洞精细化爆破和锚固施工的质量标准。设备运行过程中产生的机械振动,会扰动原本脆弱的破碎围岩与软弱围岩,破坏岩体原生结构。施工阶段可优先选用轻量化、模块化的专用设备,贴合隧洞断面尺寸开展施工作业。针对硬岩、破碎围岩、含水地层等不同地质工况,匹配对应的作业配件^[4]。精准调试设备钻进压力、推进速度等核心运行参数,削弱机械作业带来的围岩扰动,提升地下施工精度与作业稳定性。

4.2 复杂地质隧洞施工时序衔接优化

深埋隧洞地层应力状态复杂,岩体完成开挖裸露后,会持续出现形变位移与裂隙扩张现象。固化的施工时序安排无法适配不同区段的围岩稳定特性,难以适配多变的地质工况。岩体裸露时间过长,会加剧表层岩体松动脱落,大幅提升围岩失稳隐患。施工可按照岩体完整程度、地层含水状态及岩体坚硬等级划分施工区段,针对性调整工序排布方式。合理排布钻孔、掘进、清渣、支护布设的先后顺序,科学分配各工序作业时长。压缩开挖成型后的空置间隔,及时开展围岩封闭支护作业。地质条件薄弱的区段进一步收紧工序间隔,缩短岩体无防护暴露时长,提升整体施工紧凑性。

4.3 深埋隧洞施工过程动态调控工艺优化

深埋隧洞沿线地层分布不均匀,岩体强度、裂隙发育程度和地层应力状态均存在明显差异。固定单一的施工工艺参数无法适配动态变化的地下环境,容易加剧围岩破损程度。施工推进期间持续摸排观测围岩状态,结

合现场地质变化调整施工方案。围岩结构完整、岩体强度较高的区段,可适当加大掘进进尺,优化整体作业节奏。岩体松散、裂隙密集发育的区段,缩减单次掘进体量,降低施工扰动对围岩的破坏程度。根据现场工况调整锚杆布设密度、喷射混凝土厚度等关键参数,强化围岩防护效果。通过动态化工艺调整,适配深部地层复杂多变的施工条件。

4.4 开挖支护一体化施工流程优化

传统施工模式对开挖与支护作业进行拆分施工,工序之间存在明显空档,整体作业流程较为分散。这种割裂的施工方式会打乱现场作业秩序,降低狭小地下空间的施工效率,干扰隧洞成型质量。施工过程中可整合各类分散作业环节,构建连贯完整的施工作业链条。系统梳理掘进施工、岩面清理、支护构件安装、表层封闭防护等关键工序,填补各环节衔接漏洞。优化循环作业模式,规整各步骤施工流程。严格把控隧洞开挖成型平整度,为后续支护施工提供平整稳定的作业基础。统一各工序施工技术标准,让开挖成型效果匹配支护施工要求,提升深埋隧洞开挖支护施工的整体规范程度。

结束语

通过对深埋引水隧洞开挖支护全流程的技术优化,可有效弱化深部复杂地质条件对施工作业的负面影响,让开挖扰动控制、支护受力适配的各项要求落地到现场实操环节。优化后的施工体系能够充分匹配不同区段围岩的形变规律,平衡施工效率与安全管控的双重需求,强化围岩与支护结构的协同承载能力。这套经过细化调整的工艺方案,可为后续同类地下水利工程的现场施工提供清晰的技术路径,助力深埋引水隧洞建设的整体施工管控水平稳步提升。

参考文献

- [1]石杰廷.高埋深富岩爆长距离引水隧洞施工关键技术研究[J].现代工程科技,2026,5(2):41-44.
- [2]李怀国,向子云,林华,等.不良地质深埋引水隧洞支护体系数值模拟研究[J].工程建设与设计,2026(9):53-56.
- [3]王彦军.穿越破碎带的深埋引水隧洞围岩变形及稳定性研究[J].建筑机械,2025(6):191-193,197.
- [4]郭新强,邢阿龙,张伟.深埋引水隧洞安全监测数据分析[J].西北水电,2024(2):72-77.