

水利工程隧洞开挖与衬砌施工组织优化

郭建飞

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司

DOI:10.32629/hwr.v10i3.6881

[摘要] 水利工程隧洞建设普遍面临地质条件复杂、施工战线长、工期压力大等共性难题,施工组织优化成为破解上述困境的关键路径。本文立足于西北特殊工程环境,从开挖与衬砌两个维度的施工组织优化展开系统研究。在开挖方面,探讨了适应断层破碎带、高地应力及富水地层的动态循环组织模式,以及长距离独头掘进条件下的运输与通风协同调度策略;在衬砌方面,分析了复杂断面条件下模板台车选型与布设方案、混凝土长距离输送系统规划,以及开挖与衬砌平行作业条件下的时空协调机制。

[关键词] 水利工程;隧洞施工;开挖组织;衬砌组织;复杂地质

中图分类号: TV5 文献标识码: A

Optimization of Excavation and Lining Construction Organization for Hydraulic Tunnel Engineering

Jianfei Guo

Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute Co., Ltd.

[Abstract] The construction of hydraulic tunnels generally faces common challenges such as complex geological conditions, long construction fronts, and significant schedule pressure. Optimizing construction organization has become a critical pathway to address these challenges. This paper, grounded in the unique engineering environment of Northwest China, conducts systematic research from two dimensions: excavation construction organization and lining construction organization. In terms of excavation, it explores dynamic cyclic organization models adapted to fault fracture zones, high in-situ stress, and water-rich strata, as well as coordinated scheduling strategies for transportation and ventilation under conditions of long-distance single-head tunneling. Regarding lining, it analyzes the selection and layout schemes of formwork trolleys under complex cross-section conditions, the planning of long-distance concrete delivery systems, and the spatiotemporal coordination mechanisms under parallel operations of excavation and lining.

[Key words] hydraulic engineering; tunnel construction; excavation organization; lining organization; complex geology

引言

我国西北干旱区水资源时空分布不均,跨流域调水已成为保障新疆等区域经济社会可持续发展的战略选择。近年来,国家陆续开工建设多项大型水利工程,其中引水隧洞作为关键控制性工程,其建设进度与质量直接关系到工程的整体成败。与单纯依赖施工技术改进不同,施工组织优化侧重于资源配置、工序衔接、空间利用和进度控制等宏观层面的管理,目的在于通过系统规划实现效率与质量的双重提升。以新疆为例,该地区水利工程隧洞施工面临独特的自然地理条件和工程功能定位,这一特殊性要求施工组织必须突破常规模式,构建更具适应性的管理体系。本文立足新疆水利工程隧洞建设实际,从开挖施工组织和衬砌施工组织两个维度开展系统研究,探索适用于复杂地质条件的组

织优化方案,以期同类工程的建设提供理论参考与实践借鉴。

1 新疆水利工程隧洞施工的特殊性

新疆水利工程隧洞施工的特殊性源于其独特的自然地理条件与工程功能定位,这种特殊性决定了施工组织优化必须突破常规模式,建立适应性更强的管理体系。

(1) 从地质条件来看,新疆地处欧亚板块碰撞带,地质构造活跃,隧洞穿越区岩体完整性差,断层破碎带发育,且往往与富水地层相伴而生。以天山山区为例,隧洞开挖过程中常遭遇高地应力导致的岩爆问题,以及软弱围岩段的大变形问题,二者在空间上交替出现,在时间上难以预测。这种地质条件的突变性与不确定性,要求施工组织必须具备快速响应能力,不能固守静态的进度计划,而应建立基于地质反馈的动态调整机制。

(2)从空间条件来看,受高山峡谷地形限制,新疆水利隧洞普遍存在施工支洞布设困难、独头掘进距离长的问题。长距离独头掘进带来的不仅是通风散烟、降温除尘的技术难题,更对出渣运输系统、物料供应系统的组织效率形成刚性约束。运输车辆编组、调度、避让的精细化程度,直接制约着掘进循环时间。此外,在长隧洞中,开挖作业面与衬砌作业面往往需要同时推进,如何在有限断面内协调二者的空间占用与运输干扰,成为施工组织的核心难题。

(3)从气候条件来看,新疆冬季严寒漫长,昼夜温差大,这对混凝土衬砌施工提出了严峻挑战。低温环境下混凝土水化反应减缓,强度发展滞后,若养护不当极易产生温度裂缝,影响结构的抗渗性与耐久性。这就要求衬砌施工组织必须将温控措施纳入工序设计,合理安排浇筑时段,配置伴热保温设施,甚至需要对长距离混凝土输送过程中的温度损失进行精确计算。

2 复杂地质条件下水利工程隧洞开挖施工组织优化

开挖施工是隧洞工程的前置工序,其组织效率直接决定着整体进度。在新疆复杂地质条件下,开挖组织优化需要重点关注循环作业设计、运输通风协同、地质反馈机制三个关键领域。

2.1 基于围岩类别的循环作业差异化设计

新疆水利隧洞穿越的地层往往岩性多变,在同一作业面上,软岩与硬岩交替出现,断层破碎带与完整岩体频繁转换。这种地质条件的非均质性,要求开挖循环作业不能采用统一的进尺参数与支护强度,而应建立基于围岩类别的差异化组织模式。具体而言,在围岩完整性较好的硬岩段,可适当加大循环进尺,采用全断面开挖,重点优化钻孔与装药爆破的参数匹配,压缩循环时间。但在断层破碎带或软岩大变形段,必须遵循“短进尺、弱爆破、强支护”的原则,将循环进尺控制在1.0-1.5米以内,爆破后立即进行初喷混凝土封闭围岩,随后跟进系统锚杆与钢拱架支护。这种差异化设计的难点在于,围岩类别变化往往无法精确预知,需要施工现场建立快速判别机制,根据掌子面揭露的岩性实时调整循环参数。

从组织管理角度,可建立分级响应预案:将可能遇到的围岩类型划分为若干等级,针对每一等级预先编制标准作业流程与资源配置方案。一旦掌子面地质条件发生变化,现场技术负责人可快速决策,启用相应预案,避免因等待指令而造成的工时浪费。同时,钻孔与支护设备的配置也应具备一定弹性,例如配备多臂凿岩台车的同时,预留手持风钻作业面,以应对局部破碎带需要人工精细开挖的情形。

2.2 长距离独头掘进条件下的运输与通风协同调度

长距离独头掘进是新疆水利隧洞开挖组织的突出难点。随着掘进深度增加,出渣运输距离不断延长,运输车辆在洞内行驶时间呈线性增长,若不加以优化,运输环节将成为制约循环进尺的瓶颈。

运输组织优化的核心在于车辆编组与调度。在单线隧洞中,运输线路有限,重车出洞与空车进洞存在会车需求。若洞径较大,可在适当位置设置错车道;若洞径受限,则需精确计算车辆运行

时刻,避免在狭窄段会车。可采用无线通信调度系统,实时掌握各车辆位置,动态调整发车频率。此外,出渣方式的选择也需因地制宜:有轨运输在长距离条件下具有运能大、污染小的优势,但轨道铺设与维护成本高;无轨轮胎式运输机动灵活,但尾气排放对通风系统形成压力。新疆多数水利隧洞采用无轨运输为主、局部有轨为辅的混合模式,关键在于根据洞线长度与断面尺寸优化车型配置。

通风组织与运输组织密切相关。随着掘进深入,通风距离增加,掌子面需风量难以保障。若单纯加大风机功率,不仅能耗上升,且风管沿程阻力损失加剧。优化的方向在于分级加压与局部增援:在洞外设置主风机,在洞内适当位置设置接力风机,形成梯级通风系统。同时,通风风管直径的选择需与洞径匹配,过大则占用运输空间,过小则阻力过大。在富水地层或有毒有害气体溢出风险段,还需配置局部通风设备,确保掌子面空气质量达标。运输与通风的协同体现在:重车出渣高峰时段,柴油设备密集运行,尾气排放量大,此时需相应加大通风量;反之,在爆破后通风排烟时段,可暂停运输作业,形成工序间的自然衔接。

2.3 地质超前预报与开挖支护的动态闭环

新疆复杂地质条件下,开挖组织优化的最高境界不是追求最快的进尺速度,而是追求最少的停工待工时间。地质突变往往是造成水利工程隧洞开挖停工的主要原因:突遇断层未提前预报,可能导致掌子面塌方,处理塌方耗时数日甚至数周。因此,建立地质超前预报与开挖支护的动态闭环,是开挖组织优化的核心内容。超前地质预报不应被视为一项孤立的技术工作,而应嵌入开挖循环成为固定工序。在每一循环钻孔的同时,安排专门时间进行地质雷达探测或超前钻孔取芯,将预报成果作为下一循环参数调整的依据。预报发现的富水区或破碎带,需提前制定注浆加固或管棚支护方案,避免揭露后仓促应对。这种“探掘结合”的组织模式,虽然在一定程度上占用了循环时间,但从整体工期考量,可以大幅降低突发灾害造成的停工损失。

3 适应水利工程隧洞衬砌质量要求的施工组织优化

衬砌施工是隧洞工程形成永久结构的关键环节,其质量直接关系到输水安全与工程寿命。新疆水利隧洞对衬砌混凝土的抗裂、抗冻、抗渗要求极高,而复杂断面与恶劣气候又增加了质量控制的难度。衬砌施工组织优化需围绕模板台车选型、混凝土输送系统规划、时空协调机制三个层面展开。

3.1 适应断面变化的模板台车选型与布设方案

新疆水利隧洞受地质条件与水利工程设计双重影响,断面形式多样,标准段与渐变段、岔洞段交替出现。若全线采用单一模板台车,难以适应断面变化;若频繁更换台车,又会导致衬砌作业长时间中断。因此,模板台车的选型与布设需兼顾适应性与连续性。在长隧洞标准段,宜采用全断面针梁式钢模台车,这种设备可实现边顶拱一次性浇筑,衬砌速度快、成形质量好。但在断面变化频繁的洞段,针梁台车调节范围有限,可考虑采用组合钢模与满堂支架相结合的方案,虽然单次浇筑长度缩短,但可灵活适应断面渐变。从组织优化角度,应在地质勘察阶段尽可能准

确预判断面变化位置,提前规划台车投入数量与转场顺序。对于岔洞等异形结构,可安排专项班组进行精细化支模,与标准段台车衬砌形成流水作业,避免因异形结构影响整体进度。

3.2 长距离混凝土输送系统规划与质量控制

新疆水利隧洞洞线长,混凝土输送距离动辄数公里,若采用单一的洞外集中拌和、罐车运输模式,混凝土在运输过程中易发生离析、坍落度损失,且冬季低温条件下热量散失严重,影响入仓温度。因此,输送系统的规划需要从供应链视角整体设计。一种优化方案是“集中拌和+中途接力”。在洞外设置大型拌和站,配置大容量搅拌运输车,将混凝土运送至洞内中转站,再由小型输送泵或二次搅拌车转运至衬砌作业面。中转站的位置需综合考虑洞内交通条件与浇筑强度要求,通常选择在洞径较宽、便于会车的段落。中转站应配备混凝土缓存与二次搅拌设备,确保入仓混凝土的和易性符合要求。对于超长距离隧洞,可考虑在洞内适当位置设置临时拌和站,利用洞外输送的干料或半成品现场加水拌和。这种方式虽增加设备投入,但可显著降低长距离运输的质量风险。无论采用何种方案,混凝土输送系统必须与衬砌作业节奏匹配:衬砌台车单次浇筑长度通常为6-12米,需连续浇筑数小时,输送系统应具备连续供应能力,避免因断料造成冷缝。

3.3 开挖与衬砌平行作业条件下的时空协调

在长隧洞施工中,为缩短总工期,通常采用开挖与衬砌平行作业的模式,即前半段进行衬砌施工的同时,后半段继续推进开挖。但这种模式在有限洞内断面上极易产生干扰:衬砌作业占用运输通道,导致后方开挖的出渣车辆无法通行;衬砌浇筑期间,爆破震动可能影响新浇混凝土的质量。时空协调优化的核心在于合理划分区段与错峰安排。首先,应根据洞内交通条件,将隧洞划分为若干施工区段,各区段之间设置缓冲区或错车道。开挖与衬砌在同一时段内分别位于不同区段,避免面对面冲突。其次,应精确计算衬砌作业占用通道的时间窗口,与开挖运输调度系统联动,在衬砌台车就位、混凝土浇筑、养护等不同阶段,对通道通行权限进行动态管理。

4 水利工程隧洞开挖与衬砌衔接的系统性优化

4.1 仰拱先行与边顶拱跟进的组织逻辑

在水利工程隧洞软岩大变形或高地应力段,及时施作仰拱对控制围岩变形具有关键作用。仰拱先行意味着在开挖工作面推进一定距离后,立即安排仰拱衬砌施工,然后再进行边顶拱衬砌。这种组织模式有利于早期稳定围岩,但仰拱施工会占用洞内通道,对后方运输形成干扰。优化方案是在仰拱施工段落设置临时栈桥,保证运输车辆可从上方通过,避免因仰拱开挖造成交通中断。栈桥的架设与拆除需纳入工序设计,与仰拱混凝土浇筑、养护周期统筹考虑。同时,仰拱施工应尽可能采用移动式模板,减少支模时间,缩短通道占用周期。

4.2 二衬滞后距离的优化决策

水利工程隧洞二次衬砌滞后开挖工作面的距离,是施工组织设计的重要参数。滞后过近,爆破震动可能损伤新浇混凝土;滞后过远,围岩暴露时间过长,软弱围岩可能发生松弛变形甚至塌方。新疆复杂地质条件下,这一距离需根据围岩类别动态调整。对于稳定性较好的硬岩段,滞后距离可适当缩短,以加快衬砌进度;对于软岩大变形段,则应当适当延长滞后距离,待围岩变形收敛后再施作二衬,避免衬砌承受过大形变压力。从组织管理角度,可建立监测反馈机制:在典型断面布设收敛计,实时监测围岩变形速率,当变形速率降至允许值以下时,启动衬砌施工。这种动态决策模式将地质监测与工序安排紧密结合,体现了施工组织的精细化特征。

4.3 资源动态调配与供应链保障

水利工程隧洞开挖与衬砌两个系统对资源的需求存在差异:开挖系统消耗的主要是爆破器材、锚杆、钢拱架,对运输设备的占用集中在出渣环节;衬砌系统消耗的主要是钢筋、混凝土、模板,对运输设备的占用集中在材料进场环节。在资源总量有限的情况下,需建立动态调配机制,避免两个系统争抢同类资源导致效率下降。具体措施包括:建立统一的设备调度中心,对运输车辆、混凝土罐车、吊装设备进行集中管理,根据各作业面优先级动态分配;建立材料供应预警机制,根据施工进度预测未来一周的材料需求量,提前组织采购与运输,避免因供应中断造成的窝工。新疆地域辽阔,工地往往远离城市,供应链稳定性尤为重要,需储备一定容量的应急物资,以应对极端天气或交通中断等突发情况。

5 结论

水利工程隧洞施工组织优化是一项系统工程,其核心在于深刻把握复杂地质、长距离空间、极端气候、刚性工期四重约束的内在关联,建立具有针对性的组织方案。研究表明,水利隧洞施工组织优化的本质,不是追求单一工序的极限速度,而是追求各工序、各系统之间的均衡匹配与动态协同。只有将地质适应性、工序衔接性与资源均衡性统筹考虑,建立基于反馈的动态调整体系,才能在复杂条件下实现安全、进度与质量的多重目标协同。

[参考文献]

- [1]李文新,王青海,邓西宝.新疆ABH生态引水隧洞工程地质条件及问题分析[J].资源环境与工程,2021,35(04):474-478.
- [2]王江,王建.新疆某引水隧洞工程钻爆法施工机械化配套与组织设计[J].隧道建设(中英文),2017,37(S2):183-188.
- [3]王怀义,马清伟,李双喜.新疆严寒地区输水隧洞二次衬砌混凝土抗冻耐久性研究[J].混凝土,2018(07):156-160.

作者简介:

郭建飞(1983--),男,汉族,新疆奇台县人,本科,高级工程师,研究方向为水利水电工程施工组织设计。