

# 深埋长输水隧洞施工技术浅析

文 / 剡国强 广东粤海粤西供水有限公司

**摘要：**深埋长输水隧洞作为跨流域调水与大型水资源配置工程的关键基础设施，具有埋深大、围岩应力高、地质条件复杂、施工周期长与安全风险集中的特点。围绕该类工程的施工技术难题，本文从勘察与设计一体化、围岩分级与信息化施工、开挖方法与支护体系优化、超前地质预报与风险管控、通风排水与环境控制、以及智能化监测与运维衔接等方面展开浅析。通过对典型工法（TBM与钻爆法协同、CRD/CD法、超前小导管与管棚、初期支护+二次衬砌协同设计）的对比与应用场景梳理，结合高地应力、涌水突泥、软弱夹层与断层破碎带等不良地质的防治措施，形成“预测—监测—反馈—优化”的闭环施工思路。研究旨在为复杂山岭区深埋长隧的安全、高效、经济与绿色施工提供技术参考，并为后续全寿命期运营维护奠定数据与标准化基础。

**关键词：**长输水隧洞；施工；方法；技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.23.076

## 引言

随着我国水资源时空分布不均与区域用水矛盾的加剧，深埋长输水隧洞已成为大型引调水工程的重要实施路径。此类隧洞多位于高山峡谷或深覆岩地段，受原位应力、构造活动及地下水作用的共同影响，易出现围岩大变形、岩爆、突水突泥与衬砌开裂等问题，对施工组织、工期与安全提出更高要求。近年，TBM国产化突破、数字孪生与BIM+CIM平台应用、以及新型支护材料与装备的迭代，为提升施工效率与风险可控性提供了新工具。然而，如何在复杂多变的地质环境中实现工法选择的精细化、信息化监测的实时化、支护参数的动态化与环境影响的最小化，仍是工程实践的难点与热点。本文在总结现有工程经验的基础上，针对关键技术环节进行梳理与讨论，以期为类似工程提供可复制、可推广的施工技术路径。

## 一、工程概况

某跨流域调水工程由三段长隧与局部压力管道组成，总长约540 km，其中隧洞约516 km。单洞最长连续掘进段大于280 km；关键扬水枢纽单级净扬程约180-190 m。为实现长距离稳定供水，严寒地区深埋超特长隧洞的安全施工成为控制性环节。工程拟采用TBM为主、钻爆协同的总体思路，单机连续掘进长度目标>20 km，TBM占比约80%。

## 二、地质构造

### （一）断裂构造

本项目位于某两个主要的阿尔泰褶皱带中，其内部的褶皱结构控制了该地区的地形地貌与地质结构。隧洞穿越8条区域性断裂，断层的范围为100-200米，最宽800米。此外，该区还分布次一级的断层破碎带129条。在引水管线整体上，断裂、裂缝均不发育，主要分布在中至陡峭的倾斜方向上，断裂表面主要被石英脉体所填充，以压扭性结构面为主。

### （二）地震安全性评价

工程沿线50年超越概率10%的地震动峰值加速度大

部分位于0.15g区域，有些集中在0.10g以内，对应的地震基本烈度为Ⅶ度区。

## 三、工程地质

### （一）主要工程地质条件

根据规范要求，某Ⅰ/Ⅱ段：Ⅱ、Ⅲ级围岩占比>80%，饱水抗压30-140 MPa（峰值至170 MPa），石英含量20-35%（局部更高），整体适宜TBM高速掘进。某Ⅲ段（含软弱段）：Ⅱ、Ⅲ级合计约69%，Ⅳ、Ⅴ级约31%；局部泥岩、砂岩、砂砾岩饱和抗压8-30 MPa，存在软化崩解倾向，需防塌与大变形。在此基础上，对沿隧道各钻孔分别采集2-3批岩石样品，开展了735组岩石的物理力学特性实验。初步探明了该地区的工程地质、水文地质情况，并对其潜在的工程地质问题进行了较为深入的研究。

### （二）主要工程地质问题分析

#### 1. 塌方问题

综合钻孔岩芯、物探波速与井下电视资料，洞身大多位于完整的新鲜岩体中，以块状、厚层状岩性为主，断层与节理裂隙总体不甚发育，围岩整体性较好。按现有地质信息评估，约19处，累计约50+ km，常与构造带、浅埋土层、邻近河谷底部相关。其中，总体干旱区裂隙水为主，突水概率不高，但塌方敏感区往往与冒水区重合，需采取超前预注与导排结合。局部埋深>650 m，最大水平主应力达21.6-36.0 MPa，判属中—高应力区；强度—应力比3-4为中度岩爆阈值参考。连续软岩段合计>35 km，易塑变、流变、鼓胀。建议“短进尺、强支护、快封闭”。

#### 2. 涌水问题

洞线位于阿尔泰山南坡山区中、低山区、低山丘陵及冲洪积扇区，除西二段穿越KMQ河、SHT河、KL河，喀一双段穿越WLG河外，其余地段均为干旱、降雨少、蒸发强烈，对该地区的基岩裂缝及断裂带的补充作用很小。对于相对完好的洞室，其形成的渗流场或线形水流

多为裂缝水，不太可能出现突涌突泥。容易冒水的隧洞断面，与容易出现坍方的断面的位置基本一致，但因隧洞较长，埋深较大，故在建设过程中仍然要重视加固排水。

### 3. 岩爆问题

三段隧洞共布置9眼应力钻孔，总进尺3445m。西二段埋深约100-690m范围，最大主应力7.2-21.6MPa、最小4.6-15MPa，整体为中低应力；其中埋深 $\geq 500$ m的约18km区段，最大主应力15-19.6MPa，强度—应力比为3-4，判属中度岩爆。喀—双段埋深约100-700m，最大水平主应力6.6-36.0MPa、最小5.7-22.8MPa；当埋深 $>650$ m时，最大主应力达21.6-36.0MPa，属中—高应力岩爆区。其余区段仅见轻微岩爆或基本不发生。

### 4. 软岩变形问题

软岩主要见于双与双—三段。双段尾端连续软岩约11.7km，岩性为二叠—三叠系砂岩、砂砾岩、泥岩及含炭泥岩，脆性较强，干态抗压强度：砂岩18.7MPa、泥岩13.6MPa，围岩以IV级为主，易出现塑性变形。双—三段后部连续软岩约26.3km，岩性为侏罗系、白垩系及新近系泥岩夹砂岩、砂砾岩，易软化崩解；砂砾岩干抗压12.5MPa、泥岩8.6MPa，围岩IV~V类，倾向塑性变形及鼓胀（膨胀）或流变。施工建议采用“短进尺、强支护、快封闭（快衬砌）”。

## 四、深埋长输水隧洞施工技术施工组织设计

### （一）深埋隧洞施工支洞及TBM进入通道型式的选择布局

#### 1. 隧洞地质勘测及选线优化设计

在详细调查工程场区地质情况的基础上，针对卡拉麦里山自然保护区环境保护需求，综合地形地质、环境保护、施工工艺、用水量和经济可行性等多方面，对隧道线路布局进行系统评估和科学论证，对隧洞平纵剖面进行科学的设计，并给出相应的安全、可靠的支撑形式。

#### 2. TBM与钻爆法可掘性评价及合理洞段划分

根据地层类型、断裂构造分布、施工工艺、设备能力、施工环境等因素，对TBM和钻孔爆破施工的工程地质环境进行研究，确定施工支洞的布设方式，通过对工程平面布局、工期、环境影响、投资等方面的全面对比，确定具有较高经济效益的隧道施工技术方

#### 3. 深埋大坡度缓斜井施工技术

在初步确定TBM缓斜井进洞方案的基础上，与钻孔爆破技术的支洞布局相联系，从安全保证、技术经济性、工期效益、运输材料等方面对其进行合理选择。本项目拟开展长距离、大斜度缓倾斜斜坡的建设与快速施工工艺研究，主要是采用TBM与钻孔爆破相结合、缓倾斜与正向隧道TBM相结合的方法。

#### 4. 深埋中间竖井建造及物流、通风技术

本项目针对TBM与钻爆法在安全、高效、通风等方面的技术需求，对深埋竖井的必要性与可行性进行了研究，对立井的位置、断面、数量等进行了科学的布置，并结合其使用性能，对其施工工艺及吊装、卸碴、抢险、通风等关键技术进行了研究。

### （二）超特长隧洞分段施工及TBM掘进方案优化设计

#### 1. 隧洞施工方案选择及其分段规划优化施工问题

喀—双隧洞II、III类围岩占比86.2%，石英含量总体不高，宜充分发挥TBM自身优势，延长掘进长度，从而降低工程造价和风险，提高施工效率，因此选择以TBM为主的施工方案。但在大型断层、软弱岩层中，应采取钻孔爆破技术，以避免危险。如何正确地进行TBM与钻孔爆破技术在隧道工程中的应用，并对TBM进入隧道、中间支洞和爆破下支洞的位置进行了研究。根据确定的入洞方案，研究TBM大型部件的结构分块设计和精确装配技术，包括大型部件的吊装运输、组装洞室开挖支护、洞内始发、步进、拆解等成套技术，并以此对TBM设计制作以及关键部件的洞内拆解工艺、专用工装设备等提出具体技术要求。

#### 2. 超特长隧洞出碴和物料运输技术

通过对各阶段工程设计方案及横截面布局的设计，对主要隧道、缓倾斜连续皮带机、有轨运输、无轨双向驱动橡胶轮等进行了安全、合理的分析；研究了带式清碴装置的可靠度、碴土适配性、主要隧道、缓斜井出碴与材料输送与输送的协调体系；在保证安全性、有效性的前提下，研究并建立了隧道出碴与物流输送的安全调控方法。

#### 3. 超特长隧洞独头通风技术

优化通风系统设计和设备选型方案，保证二次通风系统与总体通风方案的协同性；对隧道进行实时的通风和环境监测，对隧道的安全健康保证方法进行研究；对既有通风、排烟设施进行了科学评价，对“一站式”、“多站式”和“风井”等通风方式进行了技术上的论证，并对其进行了详细的设计要求；对各种型号风机的性能，风管材料，技术参数，以及它们与空调的匹配程度等进行了研究。

#### 4. 超特长隧洞TBM连续掘进及出碴、通风、供排水、物料运输问题

TBM最大开挖长度为23-26km，最大开挖深度为700米以上，出渣物料输送、通风、送水、送水等作业的间距和标高均已超过已建工程。因此，如何科学地设计和开发适合我国国情的卸荷输配运输系统、通风与供水系统、运行监控与管理系统、施工与安全保障体系，是一个极具挑战的课题。

(三) TBM 集群施工及配套系统高效运行管理

1. TBM 选型及掘进系统协调控制技术

系统开展开敞式与护盾式掘进机，以及同类掘进机结构参数、生产能力、掘进速度的优化比选，研究 TBM 掘进系统中主机系统、后配套系统、主机附属设备、外部生产系统的协调匹配性，提出设计制造的主要技术要求和风险应对措施。本项目针对我国深埋隧道工程建设需求，以提高 TBM 的自主纠偏与精准引导为目标，对 TBM 掘进、卸碴、动力传动、支护、辅助辅助等各个系统的作用布置与主要构件进行研究，实现 TBM 装备的技术先进与经济实用的兼顾。

2. 出渣问题

隧洞出渣采用轻轨单车道运输，洞身每隔 200 m 左右间距设置一错车道，错车道布置位置可根据开挖围岩情况适当调整，应布置于围岩类别相对较好地带。错车道布置见图 1、图 2。支洞轨道每隔 8 m 设一组防滑装置，人行道设置台阶、安全栏杆及纵向排水沟。

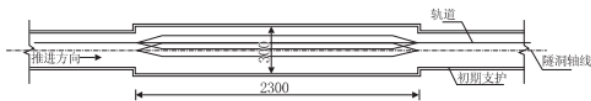


图 1 错车道平面布置图 (尺寸单位: cm)

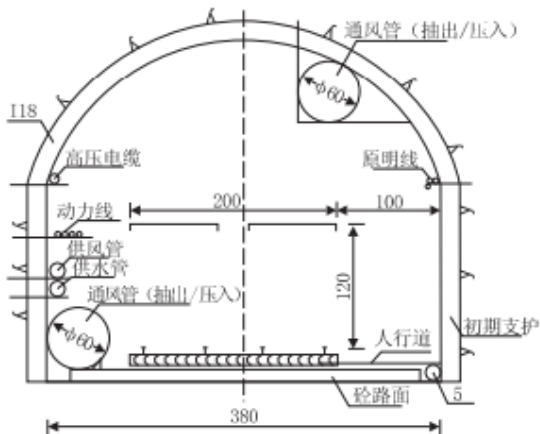


图 2 错车道横断面布置图 (尺寸单位: cm)

3. TBM 长寿命设计与掘进参数智能控制技术

在深埋隧道施工中,对主传动系统和刀盘的耐久性、耐磨性和结构刚度等都有较高的要求。主要研究内容包括:主传动系统在长使用周期中的可靠运行与传动效率;主传动密封与盘体结构的修复技术;合理的刀盘结构与刀具布置方式;刀盘耐磨与高精密焊接技术等。此外,掘进参数与周围环境参数的适应性、掘进参数的自动调控等也是决定 TBM 服役年限的重要因素。

4. TBM 状态检测及故障自修复技术

研究 TBM 运行状况识别和性能指标的评定准则,构建基于状态监控和故障诊断的理论和方法,实现对 TBM

运行状态的动态分析和动态分析。通过对 TBM 的故障特性分析,构建其故障数据库,构建故障自诊断与自愈技术系统,以保证 TBM 在超长进尺条件下的使用寿命。

5. TBM 综合信息管理系统开发及应用

对 TBM 集群的工艺进行了多视角多层次的采集与分析,并对其各项性能和性能进行了全面的分析;为保证工程建设的质量、安全监控等工作的信息化,必须建设项目的建设管理系统;构建设备支持系统的基础设施,使设备维修、故障排除及设备零部件的信息管理;在此基础上,构建 TBM 集群作业调度决策支撑体系,对作业状态进行评估,对成本效益进行分析,对工程质量进行监控,并给出相应的工程进度安排、主轴备份方式、数量等其他备件量。

结语

综上所述,深埋长输水隧洞的建设是跨流域调水与大型水资源配置工程的核心环节,其技术体系需在复杂地质、超长工期与高安全风险约束下实现协同最优。本文围绕“预测—监测—反馈—优化”的闭环思路,提出以勘察设计一体化为前提、TBM 与钻爆法协同为抓手、信息化施工与动态支护为主线、超前地质预报与风险管控为保障、通风排水与环保控制为底座,并以智能监测和全寿命运维衔接为延伸的成套技术路径。针对高地应力、涌水突泥、软弱夹层及断层破碎带等不良地质,强调短进尺、强支护、快封闭与快速出渣的组合策略,以及 TBM 长寿命设计、参数智能调控与状态自诊断的关键支撑。面向严寒与超特长条件,需构建高效物流、独头通风与集群化调度管理体系。未来应加强数字孪生、BIM/CIM 与标准化数据的深度融合,形成可复制、可推广的技术与管理范式,支撑工程安全、高效、经济与绿色建造目标的达成。

参考文献

[1] 刘礼政, 张议, 王党雄. 基于 TRIZ 理论的新型筒形阀创新设计 [J]. 东方电气评论, 2019, 4 (2): 53-56.  
 [2] 高昂, 吴时强. 抽水蓄能电站侧式进出水口体型及水力特性研究进展 [J]. 南水北调与水利科技, 2018, 8 (2): 132-139.  
 [3] 高学平, 毛长贵, 孙博闻, 等. 输水隧洞坡角对侧式进/出水口水力特性影响研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2019, 7 (2): 189-195.  
 [4] 高学平, 朱洪涛, 孙博闻, 等. 不对称地形下进/出水口明渠段环流特性研究 [J]. 水力发电学报, 2019, 13 (8): 48-60.  
 [5] 毕宏伟, 胡少华, 乔彤. 高水头抽水蓄能电站高压岔管围岩非线性渗流分析及渗透稳定性研究 [J]. 水利水电技术, 2018, 49 (6): 171-178.