

高速公路隧道机械钻爆法信息化施工技术要点

张志东

云南交投集团公路建设有限公司 云南 昆明 650000

摘要: 随着我国高速公路隧道工程技术发展较快,突破性的建成多条高速公路的隧道工程,隧道施工技术主流趋势正朝着机械化、信息化、专业化、安全化、绿色和低碳等方向发展,传统隧道施工绝大多数采用人工钻爆法施工,安全水平不高,安全形势严峻该施工模式已难以满足现代机械化施工需求。本文以西香高速TJ4-3项目大梁子隧道、牟家坪隧道全过程工序机械化、信息化施工或半机械化、信息化施工为基础,深入探讨了高速公路隧道机械钻爆法机械化、信息化施工的技术内涵与核心要点。实现“机械化减人、自动化换人,矿山法全工序机械化配套等施工工艺工法”的技术更新,总结目前隧道机械钻爆法信息化施工技术,保障隧道施工质量和安全,隧道机械化、信息化施工不仅隧道施工技术发展趋势,还是技术手段的升级,更是项目全生命周期管理理念的革新。

关键词: 高速公路隧道;机械钻爆法;信息化施工;智能机械装备

引言

隧道工程作为高速公路网络的关键控制性节点,其建设水平直接关系到路网的整体效能与运营安全。长期以来,我国公路隧道建设主要依赖传统的“新奥法”理念,辅以人工或半机械化作业,在面对复杂多变的地质条件、日益严苛的安全环保要求以及紧迫的工期压力时,暴露出超挖欠挖控制难、围岩扰动大、工序衔接不畅、安全风险高等一系列瓶颈问题。在此背景下,国家及行业主管部门大力倡导并推行隧道工程的“四化”建设——即机械化、工厂化、专业化、信息化既能保障施工安全,又能提高施工效率。其中,信息化施工被视为打通“四化”建设任督二脉的核心引擎。它不仅是对传统施工流程的数字化映射,更是通过构建一个覆盖全序机械化隧道施工数据驱动支持系统,实现对隧道建造全过程的施工机械化、自动化、信息化或半机械化、信息化施工。

1 机械化施工的内涵与总体框架

全工序机械化配置包括一种满足隧道开挖及超前地质预报、初期支护、仰拱等检底与铺底、二次衬砌等四条基本作业线均采用机械化作业的机械设备配置,分为采用挖机破碎头等非爆开挖的全工序机械化配置和采用凿岩台车开挖的全工序机械化配置,主要包括超前地质钻机、凿岩台车(挖机破碎头等)、多功能台架、锚杆台车、钢架安装台车、混凝土湿喷台车、自行式仰拱栈桥、防水板钢筋作业台车、衬砌台车、衬砌养护台车等。半工序机械化配置包括一种隧道开挖不采用凿岩台车钻孔,而是人工手持风钻钻孔的钻爆法机械化配置形式,相比于全工序机械化配置主要配置区别在于取消凿岩台车,应有锚杆台车、拱架安装台车、混凝土湿喷台车等。

机械化、信息化施工并非简单的“机械施工”,其本质是以数据为核心,首先是地质透明化,通过先进的超前地质预报技术,实现对掌子面前方未知地质体的精准“透视”,为动态施工提供前置依据;其次是机械装备智能化,依托高度集成的智能施工机械设备的集群(全工序机械化施工或半工序机械化),实现关键工序的自动化、精准化作业;再次是工序协同化,利用信息化平台对开挖、支护、衬砌等各工序进行精细化调度,确保全工序链的无缝衔接与高效运转;最后是管理精细化,基于全过程、全要素的施工质量监控数据,构建风险预警与决策支持模型,实现对工程质量、安全、进度、成本的精细化管控。这四相互依存、互为支撑,共同构成了一个闭环、动态、自适应的机械化施工生态系统。

2 地质透明化:超前地质预报是动态施工的基石

2.1 超前地质预报体系的构建

隧道施工最大的不确定性源于地质条件的复杂性和隐蔽性,机械化施工明确强调“施工时应先探后挖,及时预报”。因此,实现地质透明化是机械化施工的首要前提。一个完整的超前地质预报体系必须遵循“长短结合、多法并用、动态验证”的原则,绝非单一技术所能胜任。长距离预报方法如TSP(隧道地震波法)主要用于宏观地质构造的识别,能够在开挖前较远距离内圈定不良地质体的大致位置和规模,为施工方案的宏观调整提供依据;而中短距离预报则依赖地质雷达(GPR)或瞬变电磁法(TEM)等手段,用于细化不良地质体的边界和性质,尤其适用于探测前方富水区或小型空腔^[1]。然而,真正决定下一循环开挖安全与否的,是临近预报环节。机械化施工特别强调了加深炮孔法和超前水平钻探的重要性,前

者成本低、操作便捷,可直接获取掌子面前方岩芯,直观判断岩性、节理发育及渗水情况;后者则能提供更精确的地质参数和涌水量数据,是应对高风险地质段(如高压富水断层)的“金标准”。

2.2 信息化赋能地质预报

信息化技术极大地提升了地质预报的效率与价值。各类预报原始数据与解释成果被统一上传至数字孪生平台,与三维地质模型进行空间配准与融合,生成直观、立体的“地质剖面图”或“地质云图”,使复杂的地质信息一目了然。更重要的是,随着开挖的推进,实际揭露的地质情况会不断反馈回来,信息化平台能够自动比对预报结果与实际揭露的差异,并据此动态修正前方的地质模型,使后续预报的准确性越来越高,真正实现“越挖越明白”。基于历史地质数据库和机器学习算法,平台甚至可对预报出的不良地质体进行自动风险评级,并推送相应的应急预案和技术措施建议。地质透明化的最终目的是服务于动态施工。机械化施工提出的“及时反馈结果,并及时评估和调整开挖工法、支护参数……”正是这一思想的体现。在信息化平台上,这个过程形成了一个高效的闭环:从超前预报触发预警,到信息自动推送、各方在线会商、变更方案审批下发,再到现场执行与效果反馈,整个流程被压缩至数小时内完成。这种“预报-决策-执行-反馈”的信息化闭环,将传统耗时数天甚至数周的设计变更流程极大提速,显著提升了工程应对突发地质风险的能力。

3 装备智能化:机械化施工的数据源头

3.1 智能机械集群及其功能

现代隧道智能机械装备已不再是简单的动力工具,而是集成了传感、控制、通信模块的移动数据终端,成为信息化施工体系的“神经末梢”和数据源头。以智能凿岩台车为例,其内置的惯性导航系统(INS)和激光扫描仪,可在钻孔前对掌子面进行高精度三维扫描,生成点云模型。该模型不仅能用于精确规划炮孔位置和角度,还能与设计模型进行比对,计算出实际轮廓线,为爆破设计提供精准输入^[2]。钻进过程中,台车实时记录每个炮孔的深度、倾角、钻速、推力等参数,这些数据直接反映了岩体的强度和完整性。同样,智能湿喷机械手配备3D扫描系统,可在喷射前对岩面进行扫描,自动计算所需喷射混凝土方量,并规划最优喷射路径;拱架安装台车则能确保钢拱架间距、垂直度等关键参数精准可控。

3.2 机械装备数据的采集与应用

这些智能装备产生的海量数据,通过物联网(IoT)技术实时回传至数字孪生平台,其价值体现在多个层面。

首先,它实现了施工过程的全程可追溯,每一根锚杆、每一个炮孔、每一段喷射混凝土都有其唯一的“数字身份证”,为质量验收和责任界定提供了铁证。其次,通过对历史钻爆数据的深度挖掘与分析,可以不断优化爆破参数,如炸药单耗、孔网参数等,从而实现精准爆破,有效控制超欠挖,减少对围岩的扰动。最后,平台可对设备的运行状态、油耗、故障代码等进行实时监控和预测性维护,避免因设备故障导致的工期延误。装备的智能化,使得原本依赖工人经验和感觉的“模糊”施工,转变为基于精确数据的“量化”施工,从根本上保障了工程质量和施工效率,也为后续的工序协同与精细化管理奠定了坚实的数据基础。

4 工序协同化:全工序链的高效运转

4.1 基于BIM的4D/5D施工模拟

信息化施工为实现这种高标准的协同管理提供了强大工具。在数字孪生平台上,可以将施工进度计划(4D)乃至成本计划(5D)与三维BIM模型进行关联。通过虚拟建造模拟,项目管理者可以在施工前就清晰地看到不同开挖工法下各工序的空间布局和时间安排是否合理,关键线路是否存在冲突,资源(人员、设备、材料)配置是否均衡,以及安全步距能否在任何时刻都得到保证。这种“先试后建”的模式,能够提前发现并解决潜在的协同问题,优化施工组织方案。

4.2 实时进度与资源调度

施工开始后,通过智能装备回传的数据、人员定位系统、物料管理系统等,平台可以实时掌握当前开挖里程、各工序完成百分比、设备所在位置及工作状态、材料库存及消耗速率、人员在岗情况等全方位信息。当某道工序出现滞后时,平台能自动预警,并基于预设的规则或AI算法,智能调整后续工序的资源投入或作业计划,确保整体工期目标不受影响^[3]。例如,若喷锚工序因设备故障而延误,系统可自动通知二衬班组推迟进场,并重新规划仰拱栈桥的移动时间。尤为值得一提的是,机械施工必需明确将“先支后锚”调整为“先锚后支”,即开挖后立即施做锚网主动支护。这一工艺变革对工序衔接的时效性提出了极高要求。信息化平台可以通过自动触发任务和时限监控来保障其顺利实施:一旦开挖台车完成作业并撤离,系统自动向锚杆台车和挂网班组推送作业指令;同时,系统设定从开挖完成到锚杆安装完成的最大允许时间,超时即发出警报,督促现场加快进度,确保围岩在最短时间内得到有效约束,从而充分发挥新奥法“主动支护”的核心优势。

5 管理精细化:全过程监控量测与风险预警

5.1 监控量测的信息化升级

信息化施工推动了监控量测的全面升级,彻底告别了传统依赖人工读数和纸质记录的低效模式。如今,全站仪自动监测系统、静力水准仪、光纤光栅传感器、多点位移计等自动化设备被广泛应用,实现了对拱顶沉降、周边收敛、围岩内部位移、钢架应力、锚杆轴力等关键指标的24小时不间断、高频次采集。监测数据通过无线网络(如LoRa,NB-IoT)实时上传至云端平台,并由内置的数据分析引擎自动处理。该引擎能够绘制时程曲线,计算变化速率,并与预设的预警阈值(黄色、橙色、红色)进行比对。一旦数据异常,系统会立即通过短信、APP推送等方式向相关责任人发出预警,并附带初步的风险分析报告。

5.2 构建综合风险预警模型

信息化的优势在于能够打破数据孤岛,将监控量测数据与地质预报数据、施工工序数据、环境数据(如降雨量)等进行融合分析,构建更为精准的综合风险预警模型。例如,当监测到某段隧道收敛速率突然加快,同时该段恰好位于前期预报的断层破碎带,且近期有强降雨,系统可以综合判断该区域发生失稳的风险极高,并自动启动最高级别的应急预案。通过对大量历史监测数据的学习,AI模型甚至可以识别出某些特定的“前兆模式”,从而在险情发生前更早地发出预警,为人员疏散和抢险加固赢得宝贵时间^[4]。这种基于大数据和人工智能的精细化管理,将安全管理从事后的被动处置,转变为事前的主动预防,极大地提升了工程的本质安全水平,真正实现了从“管结果”到“管过程”的管理范式转变。

6 高效协同管理:打破壁垒的项目治理新模式

6.1 统一信息平台,消除信息壁垒

在传统模式下,业主、设计、施工、监理、监测等各方使用各自独立的系统,信息传递层层衰减、严重滞后,极易造成决策失误和管理内耗。数字孪生平台作为唯一的官方信息源,强制要求所有参与方在同一平台上进行工作,彻底消除了“信息烟囱”,确保了信息的对称性和决策的一致性。设计方在此发布和更新图纸、模型;施工方上报进度、质量、安全数据,并接收技术指令;监理方在线进行工序验收、签发指令;监测方则上传监测

数据和报告。这种模式从根本上重塑了项目各方的协作关系。

6.2 流程再造与移动应用

同时,信息化平台支持对传统管理流程进行再造。传统的隐蔽工程验收需要多方现场签字,耗时费力。在信息化平台上,施工方上传现场照片、视频和自检数据,监理方在线审核确认,整个过程几分钟即可完成,并留下完整的电子档案,极大地提高了管理效率。此外,通过开发移动端APP,管理人员无论身处何地,都能随时查看项目全景、处理待办事项、接收预警信息,真正实现了“指尖上的项目管理”。这种高效协同的管理模式,不仅提升了沟通效率,更通过流程的标准化和透明化,强化了各方的责任意识,构建了一种以数据说话、以流程为准绳的现代化项目治理体系。

结语

本文系统论述了高速公路隧道机械化、信息化施工的技术要点。研究表明,机械化、信息化施工是一个复杂的系统工程,其成功实施依赖于地质透明化、机械装备智能化、工序协同化和管理的有机融合,并以BIM+GIS数字孪生平台为核心进行集成与驱动。通过构建“预报-决策-执行-反馈”的动态闭环,信息化施工实现了从“经验驱动”向“数据驱动”的根本性转变。它不仅显著提升了隧道工程的安全性、质量和施工效率,降低了工程风险和成本,更重要的是,它催生了一种全新的、以协同和共享为核心的项目治理文化。展望未来,随着5G、人工智能、数字孪生等技术的进一步成熟,高速公路隧道机械化、信息化施工将向更高阶的“智慧建造”迈进。

参考文献

- [1]唐协,林国进,张航.公路隧道机械钻爆法施工应对策略[J].现代隧道技术,2025,62(03):217-228.
- [2]刘世豪.隧道工程钻爆法施工关键技术研究[J].交通科技与管理,2025,6(15):88-90.
- [3]秦天戈,吴立,陈倩,等.钻爆法隧道智能建造体系研究现状与发展趋势[J].现代隧道技术,2025,62(03):1-10.
- [4]金彪.钻爆法隧道智能建造技术的分析[J].中国战略新兴产业,2025,(15):158-160.