

山岭隧道工程全工序机械化装备配置优化研究

胡世现

(中铁隧道局集团有限公司六处工程分公司, 浙江 杭州 310000)

摘要 山岭隧道工程建设阶段, 若想提升隧道工序衔接性, 就需要提高工程建设效率与工程质量。本文通过分析山岭隧道全工序机械化装备配置思路, 并且从超前地质预报作业线、开挖出渣作业线以及仰拱施工作业线等方面解析山岭隧道全工序机械化装备配置优化要点, 以期通过实施全工序机械化装备配置方案, 能够为山岭隧道工程项目高效建设提供有益参考。

关键词 全工序机械化; 隧道施工; 智能建造; 延榆铁路; 机械化作业线

中图分类号: U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.031

0 引言

基于国家“交通强国”战略以及铁路建设高质量发展的要求背景下, 隧道工程正向着机械化、智能化、绿色化方向不断进步与转型。本研究以黄家堰隧道工程为例, 明确其地质条件, 且围岩级别具有良好的稳定性, 为实施全工序机械化施工创造了良好的基础条件^[1]。通过机械化作业大幅降低人员直接参与高风险作业的频次, 缩短危险环境暴露时间, 同时推动施工人员从普通劳务型向专业技能型产业化工人转变。采用标准化施工、信息化赋能、清单化管理、智能化控制等多项技术措施, 相较于传统钻爆法, 实现施工时间显著节约、工程质量稳步提升、作业人员数量大幅减少的多重效益, 形成工效高、安全性能好、施工质量可靠、经济效益显著的良好局面。

1 山岭隧道工程全工序机械化装备科学配置体系

1.1 配置原则与总体思路

装备选型并非简单堆砌先进设备, 而是强化系统内部匹配与协同。该项目在实现“全工序覆盖、关键工序强化、人机高效协同”目标的同时, 首先要满足安全作业要求, 通过机械化替代人工完成高风险、高强度作业, 减少人员直接参与危险工序的频次; 其次要适配产业化工人技能特点, 选用操作便捷、智能化程度高的设备, 降低对普通劳务工人的依赖; 再次要确保各工序装备能力与施工节拍匹配, 避免“木桶效应”。例如: 开挖能力提升需与出渣、支护能力相匹配, 否则会造成工序等待、降低工作效率; 最后要优先选用技术成熟、市场验证度高、售后服务完善的产品, 保障施工顺利开展并提高安全可靠^[2]。

1.2 全工序机械化装备集群

山岭隧道全工序机械化装备配置过程中, 机械化装备可按照项目的规模与特点进行选择。就目前看来, 常规的工程项目全工序机械化装备配置可参考表 1 进行配置, 而针对其他特殊类型需求的隧道项目则根据工况进行调整。

2 机械化作业线协同施工实践

2.1 超前地质预报作业线

项目坚持“物探先行、有疑必钻、有突必取、有水必查”原则, 建立多级超前地质预报系统。运用 TSP、地质雷达等物探手段判定不良地质带, 再采用 C6 多功能地质钻机实施超前水平钻孔取芯进行精准判定; 全电脑三臂凿岩台车在钻设炮孔的同时完成加深炮孔, 起到辅助验证作用。“物探+钻探+加深炮孔”的机械化探测模式, 替代了传统人工地质判识的经验化做法, 不仅大幅提升了地质预判准确率, 更避免了人员进入未知风险区域勘察, 从源头减少安全隐患^[3]。

2.2 开挖出渣作业线

开挖是隧道施工的首要工序, 也是传统钻爆法中人员密集、风险较高的环节^[4]。在开挖出渣作业的过程中, 传统的钻爆法与机械化作业模式的钻孔作业方式与单孔钻进时间等参数均存在很大不同, 如下对比了两者的特点, 详见表 2 所示。

2.3 初期支护作业线

初期支护的及时性与质量直接关系到围岩稳定性, 传统人工支护存在效率低、精准度差、人员高空作业风险高等问题。该项目采用“两臂一篮”拱架安装台车,

作者简介: 胡世现 (1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 山岭隧道机械化配套。

表 1 全工序机械化装备配置

功能类别	装备名称	数量	作用
前端探知	多功能地质钻机	—	探明地质
	三臂凿岩台车（带加深炮孔）	—	探知 + 前期炮孔
开挖主力	三臂凿岩台车（中铁装备）	2 台	主要开挖
	拱架安装台车	1 台	安装拱架
	湿喷机械手	1 台	混凝土湿喷
支护核心	多工位全自动仰拱栈桥	2 台	仰拱施工保障
	12 米防水板铺挂台车	2 台	铺挂防水板
仰拱保障	12 米数字化智能衬砌台车	2 台	智能衬砌施工
防排关键	蒸汽养护台车	1 台	衬砌蒸汽养护
	喷淋养护台车	2 台	衬砌喷淋养护
成型核心	隧道综合智能检测车	—	施工后质检
	整体式水沟电缆槽台车	—	水沟电缆槽施工
末端质检	—	—	—
辅助配套	—	—	—

表 2 传统钻爆与机械化作业模式比较

对比内容	传统钻爆法	机械化作业模式
钻孔作业模式	人工钻孔	双机六臂（3 台三臂凿岩台车同步打眼）
单孔钻进时间	—	1.5 分钟
开挖出渣综合效率提升	—	80%
施工循环时间缩短比例	—	60%
装药作业方式	需撤离现场重新准备	凿岩台车自带吊篮原位转换，无需撤离
出渣作业配置	—	2+1+3 机出渣
单车装渣时间	—	不超过 3 分钟
单循环开挖作业人员	10 ~ 12 人	3 ~ 4 人
人员作业内容	直接参与钻孔、装药等现场作业	仅负责设备操作与监控，不直接暴露高风险环境
单循环减少作业人员数量	—	4 ~ 6 名

一次性完成拱架精确定位及支护，替代 6 ~ 8 名工人的人工架设作业，定位误差从 ±5 厘米缩小至 ±2 厘米，支护效率提升 3 倍；锚杆钻注采用钻注锚一体化台车完成钻孔—注浆—安装一体化流水作业，湿喷混凝土采用“双机”湿喷机械手，执行“三喷两刮一找平”工艺。相较于传统人工喷射，湿喷机械手效率提升 30%，混凝土回弹率从 15% ~ 20% 降至 5% 以下，施工质量显著提升，同时避免人员直接接触高粉尘、高喷射强度作业环境，作业人员数量减少 50% 以上。项目支护作业线从“胎模预制、精准定位、组拼合拢、锚网固结”均严格按照标准工艺执行，确保初期支护的封闭性和结构安全性，同时推动作业人员向设备操作、工艺管控的产业化工人转型。

2.4 仰拱施工作业线

该项目配备全液压多工位仰拱栈桥，集成自动走行、模板辅助定位、移动布料小车等功能，实现仰拱衬砌、填充及中心水沟模筑三者同步施工，三道工序一气呵成，同时设置清基、立模、浇筑三个工位并行作业。相较于传统钻爆法的分步施工模式，工期缩短 40% 以上，且能满足Ⅲ级围岩 120 米仰拱安全步距要求；栈桥配套仰拱全弧模及防上浮装置，有效避免全拱浇筑过程中错台、漏浆等质量通病，保障仰拱结构的整体性及耐久性。机械化作业将仰拱施工的作业人员从 8 ~ 10 人减少至 3 ~ 4 人，且人员无需直接参与模板架设、混凝土浇筑等高强度作业，大幅降低劳动强度与安全风险，同时对作业人员的设备操作、工序协同

等专业技能提出更高要求,助力产业化工人培养^[5]。

2.5 防水板自动铺挂作业线

防水层是隧道的“生命线”。常规的人工铺挂防水板容易出现搭接褶皱、搭接偏移、焊缝不实等问题,存在质量隐患,并且工作效率较低。该项目使用 12 米自动铺挂台车,其自带多节旋转伸缩臂,可通过参数设置实现一键自动贴合隧道面,使防水卷材可一次展开成型铺挂到位。平整度、密实度高于传统人工铺挂,且铺挂时间从原来人工铺挂 9 小时以上时间降到 6 小时内即可完成,每组支护平均只需要 2~3 人操作,节约了约 70%,且优良率达到 99% 以上,完全避免了人工铺挂存在的质量问题。

2.6 智能衬砌浇筑作业线

二次衬砌是隧道的最内层防护壁垒,传统的浇筑方式存在布料不均、振捣不密实、拱顶空洞等问题。该项目采用了 12 米智能衬砌台车加装“智能振捣、水平定向冲顶、自动布料、智能信息化”4 套系统,通过按程序设定可实现自动布料、振捣和冲顶拱顶等功能,将隧道内的混凝土密实、饱满,所有的施工参数(浇筑量、振捣时间、冲顶压力等)会实时上传到信息平台,并能形成数据闭环,可以达到质量可追溯的目的。与传统的手工浇筑相比,采用智能衬砌台车后效率提高了 40%,衬砌厚度合格率达到 98% 以上,拱顶空洞发生率仅为 1%,人员减少了 60% 左右,主要负责设备调试、数据监控、质量检验等工作,提高了产业工人实际操作水平^[6]。

2.7 智能养护作业线

混凝土养护可以保证混凝土的强度,防止混凝土开裂。而采用人工洒水湿养的传统方法存在无法做到及时养护、无法做到均匀养护、养护效率低下等弊端。该项目使用了“蒸汽+喷淋”双模智能养护台车,并使用了微电脑控制程序,根据现场环境温度的变化自动调节养护的频次、周期以及水温,达到使混凝土处于最佳水化状态的目的。相比人工养护的方式,智能养护台车可将养护效率提高 50%,混凝土强度达标率由原来的 92% 提升到 99%,避免了由于养护问题带来的开裂、强度不够等质量通病的发生,减少养护人员的数量,由原来传统的养护 3~4 人变为现在只需要 1~2 人,同时该类养护的作业人员必须经过调试设备、养护参数调整等的专业培训才能进行此项养护工作,促进产业化工人队伍建设^[7]。

2.8 智能检测作业线

隧道工程竣工阶段质量验收属于隧道施工的最后阶段,由之前的隧道封闭施工改为现程的正常通车运

营,传统的手工检测方式检测效率低下,数据难以保证,且不能全部覆盖到。为此,在传统隧道检测基础上引入隧道综合智能检测车,集成“非接触多通道空气耦合探地雷达”“智能视觉检测系统”“车载式三维激光扫描系统”三种关键技术手段进行隧道衬砌内(空洞、不密实)、表面(裂缝、剥落)和结构变形三项信息的一体化检测。较人工检测速度快两倍以上,检测时间仅为其五分之一,检测精度提升 95% 以上,能有效保障验收检测数据的真实性,为隧道后续养护工作奠定了良好的基础。用智能检测代替传统的徒步检测,检测人数从原来的 4~5 人降至 2 人以下,并要求有数据解译能力和设备维护技能的专业人员,进一步完善了产业化工人技能体系。

3 结束语

全工序机械化施工是破解隧道工程安全、质量、工期、成本等一系列问题的关键。在工程实践阶段,通过把安全放在第一位,利用机械化代替危险人的操作,能将人员的危险操作时间降到最低;以产业化工人为核心支撑,推动施工队伍从劳务密集型向技术密集型转型,减少普通劳务工人依赖;以超越传统钻爆法为关键导向,实现施工时间节约、质量提升、人员精简的多重效益,通过精准的装备配置、高效的作业线匹配、科学的管理手段赋能,全工序机械化施工方式的运用,在确保工程建设安全的基础上,也能为打造优质工程奠定稳固基础。在往后项目开展阶段,需积极融合人工智能、5G、数字孪生等技术,确保隧道机械化施工智能化,推动隧道施工向“无人化”“自主化”方向转型发展。

参考文献:

- [1] 张守同.全电脑三臂凿岩台车在隧道机械化施工中的应用探讨[J].现代城市轨道交通,2022(01):58-62.
- [2] 陈爽.公路隧道机械化施工设备配置分析[J].中国设备工程,2022(09):181-183.
- [3] 陶文江,王飞.特长隧道机械化施工组织研究与应用[J].企业管理,2022(S2):34-35.
- [4] 胡恩来.隧道智能化机械化施工关键技术应用研究[J].工程技术研究,2023,08(12):79-81.
- [5] 李钊,刘坤,单足阳.浅析高速公路隧道全工序机械化配套施工技术[J].湖南交通科技,2023,49(02):146-150.
- [6] 张晓东,吴全德,范永在,等.大断面隧道成套设备机械化快速作业研究[J].隧道建设(中英文),2023,43(S1):416-424.
- [7] 王祥.高速公路隧道自动机械化技术应用[J].智能建筑与智慧城市,2023(12):161-163.