

# 山区高速公路隧道机械化施工技术分析

张云博

(四川公路桥梁建设集团有限公司公路隧道分公司, 四川 成都 610200)

**摘要** 山区高速公路隧道施工受地形起伏大、地质条件复杂等因素制约, 普遍存在设备适配性不足、工序衔接不畅、施工效率与安全管控失衡等实操难点。本文聚焦山区高速公路隧道机械化施工全流程, 重点分析开挖、支护、衬砌三大核心工序的机械化技术应用细节, 结合现场实测数据优化施工参数, 明确不同地质条件下机械化设备的选型标准与操作规范。结果表明, 针对性优化设备配置与工序衔接, 可有效解决山区隧道施工中超挖、支护滞后等突出问题, 在提升施工效率的同时降低安全风险。该研究成果可直接应用于山区高速公路隧道机械化施工实操, 尤其适用于硬岩、软土交互等复杂地质场景, 为同类工程施工提供可落地的技术参考。

**关键词** 山区高速公路; 隧道施工; 机械化技术; 设备选型; 工序优化

中图分类号: U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.028

## 0 引言

在山区高速公路建设中, 隧道工程占比逐年提升, 其施工质量与进度直接影响整条公路的通行效能与运营安全。当前, 多数山区隧道施工仍存在机械化设备与复杂地质适配性差的问题, 如硬岩地层中掘进设备破岩效率低下, 软土地层中支护机械操作受限, 且现行施工规范部分条款与机械化施工需求脱节, 导致工序衔接耗时过长。基于这一现实困境, 结合山区地形、地质专属特征, 深入分析机械化施工技术的应用要点与优化路径, 破解设备选型、参数设置、工序协同中的核心难题, 对提升山区高速公路隧道施工的机械化水平、保障施工安全与质量具有重要的现实意义。

## 1 山区高速公路隧道机械化施工核心难点与适配要求

### 1.1 施工环境对机械化技术的核心约束

山区高速公路隧道施工环境的特殊性, 对机械化技术提出了严格的适配要求。山区地形起伏剧烈, 隧道洞口多位于陡坡地段, 大型机械化设备的运输、进场与安装难度较大, 部分设备因体型过大无法顺利进入隧道作业面, 需拆解运输后重新组装, 增加了施工筹备时间与人力成本<sup>[1]</sup>。山区地质条件复杂多变, 硬岩、软土、破碎岩层交替出现, 单一类型设备难以适配所有场景, 易出现损耗过快、效率不稳定等问题。参考隧道施工相关规范框架, 针对山区地质波动大的特性调整设备适配判定标准, 原本采用的通用型掘进设备,

在硬岩地层中推进速度仅每分钟3~5毫米, 远无法满足进度要求。同时, 隧道施工空间狭窄、多为单洞双向作业, 设备作业半径受限, 易出现碰撞、工序衔接受阻等情况, 目前尚无统一的设备布局优化方案, 需结合现场逐步调整。

### 1.2 机械化施工现存核心难点

结合山区隧道施工实操经验, 当前机械化施工的核心难点集中在三个方面。其一, 设备选型缺乏针对性, 部分施工单位盲目选用大型设备, 忽视山区地形地质约束, 导致设备利用率偏低, 如重型拱架安装台车因隧道断面狭小无法正常作业, 只能闲置或改为人工辅助, 增加施工成本。其二, 施工参数设置不合理, 多数单位沿用平原地区参数, 未结合山区地质调查, 如硬岩地层中掘进设备刀盘转速过高, 导致刀具磨损过快, 平均每推进50厘米就需停机换刀。该参数基于3次现场测试确定, 允许±10%偏差, 但现场操作未严格遵循, 加剧了设备损耗。其三, 工序协同性不足, 开挖、支护、衬砌设备衔接不畅, 如开挖完成后支护设备无法及时进场, 导致围岩暴露时间过长, 增加坍塌风险, 这一问题源于设备调度方案缺乏灵活性, 未考虑山区施工的不确定性。

### 1.3 机械化施工的基础适配标准

山区隧道机械化施工的适配标准, 需围绕地形、地质、施工空间三大核心要素制定, 兼顾实用性与可操作性。在地形适配方面, 设备需体积小、重量轻、拆解便捷, 宽度不超过3.5米、重量控制在50吨以内,

作者简介: 张云博(1998-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向: 公路隧道施工技术。

便于陡坡运输与隧道内作业，同时配备防滑、防抖装置适配复杂路况。在地质适配方面，硬岩地层选用高强度破岩掘进设备，刀盘采用高强度合金、刀间距 70 ~ 80 毫米；软土地层选用防坍塌支护设备，同步配备注浆机械实现开挖与支护同步。在施工空间适配方

面，设备作业半径控制在 2 ~ 3 米，操作界面简洁易懂，便于狭小空间快速操作。为更清晰地呈现不同工序的设备适配要求，结合实操经验整理适配参数（如表 1 所示）。表 1 可作为设备选型的基础参考，适用于常规山区隧道施工场景。

表 1 山区高速公路隧道各核心工序机械化设备适配参数

| 施工工序 | 适配设备类型                   | 核心适配参数                              | 适配地质场景  |
|------|--------------------------|-------------------------------------|---------|
| 开挖工序 | 大型双臂凿岩台车、大型三臂凿岩台车、履带式挖掘机 | 宽度 ≤ 3.5 米，刀间距 70 ~ 80 毫米           | 硬岩、破碎岩层 |
| 支护工序 | 湿喷台车、锚杆台车                | 喷射压力 0.3 ~ 0.5 MPa，锚杆长度 2.5 ~ 3.5 米 | 软土、破碎岩层 |
| 衬砌工序 | 液压模板台车、混凝土输送泵            | 模板偏差 ≤ 5 毫米，坍落度 120 ~ 140 毫米        | 各类山区地质  |

## 2 山区高速公路隧道核心工序机械化施工技术实操

### 2.1 隧道开挖机械化技术应用细节

隧道开挖是机械化施工的核心工序，直接影响施工效率与隧道成型质量。结合山区地质特性，开挖优先选用钻爆法配套机械化设备，核心包括凿岩台车、挖掘机、装载机，其中凿岩台车的选型与操作是关键<sup>[2]</sup>。参考硬岩隧道施工技术经验，针对山区硬岩研磨性强的特点，修改了凿岩台车的钻头型号与钻孔参数，普通钻头易磨损，更换为金刚石钻头后，钻孔效率提升 30% 以上。钻孔作业需根据围岩级别调整参数，V 级围岩钻孔深度 2.5 ~ 3 米、间距 0.8 ~ 1.0 米，该参数基于 5 次现场实测确定，允许 ±5% 偏差。凿岩台车作业时预留 3 米左右未立钢架段，用于减小周边眼外插角、控制超挖量，但此举会导致超前支护无法有效嵌入未开挖围岩，增加坍塌风险。挖掘机选用小型履带式、装载机选用侧卸式，适配狭小空间，渣土清运速度与开挖速度匹配，确保开挖面无堆积（见图 1）。

### 2.2 隧道支护机械化技术优化路径

隧道支护机械化的核心是实现与开挖同步推进，降低围岩暴露时间，保障施工安全。山区隧道支护机械化包括喷射混凝土、锚杆安装、拱架安装三大环节，均需配备专用设备并优化操作流程<sup>[3]</sup>。喷射混凝土选用湿喷台车替代人工，喷射压力控制在 0.3 ~ 0.5 MPa，V 级围岩初喷厚度 5 ~ 8 厘米、复喷 10 ~ 15 厘米，喷射速度 5 ~ 8 立方米 / 小时。最初采用 0.4 MPa 喷射压力，在软土地层中易导致混凝土脱落，最终调整为 0.3 ~ 0.4 MPa，兼顾效果与稳定性。锚杆安装选用锚杆台车自动化作业，锚杆长度 2.5 ~ 3.5 米、直径 22 毫米、间距 1.0 ~ 1.2 米，安装后需进行拉拔试验，试验力不小于 150 kN。拱架安装选用拱架安装台车，拱架为 H 型钢，加工精度误差 ±3 毫米，安装时与隧道壁间隙不大于 50 毫米，采用钢楔块楔紧，该措施虽提升效率，但在破碎岩层中易出现拱架移位，需搭配临时支撑。



图 1 山区高速公路隧道开挖机械化作业图

### 2.3 隧道衬砌机械化技术实操规范

隧道衬砌机械化的核心是提升施工质量、减少裂缝、蜂窝麻面等缺陷,适配山区隧道复杂受力环境。施工主要采用模板台车配合混凝土输送泵,模板台车选用液压式,模板厚度12毫米,刚度满足要求,避免衬砌时变形。模板台车安装后需调试,确保中心线偏差不大于5毫米、平整度偏差不大于3毫米,该标准基于多次试错确定,最初调试偏差 $\pm 8$ 毫米,导致衬砌厚度不均,后续逐步优化至 $\pm 5$ 毫米。混凝土选用C30等级,坍落度120~140毫米,输送速度2~3立方米/小时,输送过程中避免离析,定期清理管道。衬砌采用分层浇筑,分层厚度不超过50厘米,振捣用插入式振捣器,时间20~30秒,避免漏振、过振。山区衬砌需考虑温差影响,浇筑后养护不少于14天,采用洒水养护,但低温环境下效果不佳,需搭配保温措施,目前相关保温方案仍在优化中。

## 3 山区高速公路隧道机械化施工优化策略与管控要点

### 3.1 机械化设备选型与配置优化

设备选型与配置优化是提升山区隧道施工效率的关键,需结合工序、地质、空间等因素制定方案,避免盲目选型。选型遵循“适配性优先、性价比合理”原则,开挖工序选用小型化、高强度凿岩台车与挖掘机,支护工序选用自动化程度高的湿喷台车、锚杆台车,衬砌工序选用刚度足够的液压模板台车<sup>[4]</sup>。参考同类山区隧道设备配置经验,针对本研究复杂地质场景,调整了设备型号与数量,原本2台凿岩台车无法满足硬岩施工需求,增加至3台并更换刀盘、钻头型号。配置需兼顾工序协同,确保各工序设备数量匹配,如开挖配备1台凿岩台车、1台挖掘机、1台装载机,支护配备1台湿喷台车、1台锚杆台车,避免设备闲置或衔接滞后。同时考虑维护便利性,选用易维护、配件易获取的设备,山区场地偏远、配件运输难,维护周期缩短至每3天1次,保障设备正常运行。

### 3.2 施工参数与工序衔接管控

施工参数与工序衔接管控,是保障机械化施工质量与安全的核心,需结合山区地质与实操经验优化参数、完善流程。参数优化分工序进行,开挖工序重点优化钻孔深度、间距与掘进速度,硬岩地层钻孔2.5~3米、掘进0.5~1.0米/天,软土地层钻孔2.0~2.5米、掘进0.3~0.5米/天,参数基于现场实测,可根据围岩变化灵活调整。支护工序优化喷射压力、锚杆参数,衬砌工序优化混凝土坍落度、浇筑速度与养护时间,

确保质量达标。工序衔接需建立灵活调度机制,明确作业时间与衔接节点,如开挖完成后,支护设备需2小时内进场,避免围岩暴露过久。最初采用固定调度方案,无法适应山区地质波动,导致衔接滞后,后续改为动态调度,根据现场调整设备进场时间,有效提升效率,同时加强操作人员协同培训,减少操作失误。

### 3.3 施工质量与安全管控实操措施

在山区隧道机械化施工中,质量与安全管控需结合机械化特点制定针对性措施,避免设备操作、参数设置不当引发问题。在质量管控方面,建立设备操作质量检查制度,专人检查各工序设备操作情况,重点核查钻孔精度、喷射厚度、锚杆锚固力、衬砌厚度等指标,每班次检查1次,发现问题及时整改<sup>[5]</sup>。参考隧道施工质量验收标准,针对机械化施工特殊性,增加设备操作精度检查项目,原本仅检查成品质量,考虑设备操作的影响,调整后质量缺陷发生率降低40%以上。在安全管控方面,加强设备安全检查,每天检查制动系统、防护装置、电路系统,重点核查高空作业设备稳定性,避免故障引发事故。同时,加强作业人员安全培训,操作人员持证上岗,高空作业佩戴防护用品,隧道内配备通风、照明设备,降低粉尘浓度与作业风险,暴雨天气需警惕洞口坍塌,提前制定应急预案,目前预案可操作性仍需优化。

## 4 结束语

山区高速公路隧道机械化施工是破解山区施工难题的关键。本文结合实操难点,分析核心工序机械化技术要点,优化设备选型与参数配置,明确设备适配标准。结果表明,机械化施工效果依赖设备适配、参数合理及人员操作能力,目前仍存在低温衬砌养护、复杂岩层设备适配等短板,后续需针对性优化方案,完善管控措施,结合山区场景迭代技术。该成果可应用于常规山区隧道施工,特长、高海拔隧道需进一步试验完善参数。

### 参考文献:

- [1] 廖景怀.智能型机械自动化在山区高速公路隧道照明中的改造应用[J].微型电脑应用,2025,41(12):291-293.
- [2] 邓发义,罗斗雄,张恒.山区高速公路特长隧道施工通风方案优化研究[J].西部交通科技,2025(01):162-165.
- [3] 周楚淮.山区高速公路超小净距隧道施工方案优化研究[J].公路,2024,69(11):385-396.
- [4] 陈创.山区高速公路隧道项目的机械化施工技术探讨[J].交通科技与管理,2023,04(11):76-78.
- [5] 张帆,黄海波.山区高速公路隧道机械化施工技术分析[J].四川水泥,2022(02):218-220.