

高速公路隧道机械化施工下 二次衬砌施工技术探析

姚顺治

(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 在隧道工程“机械化换人、智能化减人”的发展趋势下, 全工序机械化配套施工已成为山区公路隧道建设的主流模式。二次衬砌作为隧道结构承载与防水体系的核心环节, 其施工质量与开挖、支护等机械化工序的协同适配性直接决定隧道运营安全与使用寿命。本文以具体案例工程为依托, 系统梳理了机械开挖模式下二次衬砌施工全流程协同管控要求与工序质量控制要点, 分析了机械化施工中衬砌厚度不足、背后空洞、混凝土开裂等常见病害的成因, 提出针对性防治措施, 旨在为同类公路隧道机械化施工条件下的二次衬砌质量管控提供参考。

关键词 公路隧道; 机械化施工; 机械开挖; 二次衬砌

中图分类号: U455.91

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.033

0 引言

随着我国西南山区高等级公路建设的快速推进, 深埋长隧道已成为穿越复杂地形地质条件的关键构筑物。为提升隧道施工本质安全水平, 破解传统劳动密集型施工工效低、安全风险高、质量管控难等痛点^[1], 以双臂凿岩台车、智能二衬台车为核心的全工序机械化施工, 已成为公路隧道建设的核心发展方向。二次衬砌作为隧道复合式衬砌的最终安全储备, 是工程质量管控的核心环节^[2]。在全机械化施工体系下, 传统质量管控模式难以适配新的工序节奏与设备特性, 易引发衬砌厚度不足、背后空洞等病害, 威胁隧道运营安全。本文依托川汶高速大店隧道、穆肃堡隧道工程, 系统阐述机械开挖模式下二次衬砌施工的协同管控要求与质量控制要点。

1 工程概况

川汶高速 TJ9 标段有大店隧道、穆肃堡隧道两座全线控制性特长隧道, 是标段施工管控的重点区段。大店隧道左线全长 6 749 m, 右线全长 6 738 m, 最大埋深 722 m; 穆肃堡隧道左线全长 6 829 m, 施工阶段配套 1# 施工支洞和 1 座施工斜井辅助掘进, 隧道最大埋深达 1 168 m。两座隧道穿越地层均为 IV、V 级软弱围岩, 局部穿越断层破碎带, 存在岩溶裂隙水, 属于微瓦斯隧道, 施工过程中存在软岩大变形、涌水突泥、有害气体溢出等安全风险^[3]。

项目严格按照四川省交通运输厅公路隧道机械钻爆法施工相关要求, 以“机械化换人, 智能化减人”建设为导向, 推行全工序机械化配套施工模式。开挖、二次衬砌各工序均配备专用设备, 二次衬砌采用 12 m 长全液压智能二衬台车, 防排水工序配置自动铺挂台车, 仰拱施工采用 24 m 自行式仰拱栈桥, 可实现多工序平行作业, 提高衬砌施工效率和成型质量, 保证施工全过程标准化推进。

2 机械开挖模式下二次衬砌施工协同管控核心要求

2.1 机械开挖与衬砌施工的步距协同管控

针对双臂凿岩台车机械化开挖的工效特点, 项目建立了开挖进尺与衬砌施工的动态联动机制, 严格遵循《公路隧道机械钻爆法设计与施工指南》管控要求, 结合围岩级别动态调整开挖循环进尺: V 级围岩开挖循环进尺不超过 2 榀钢架间距, IV 级围岩不超过 3 榀钢架间距, 同步控制仰拱单次开挖长度不超过 6 m, 确保仰拱初支快速封闭成环, 为二次衬砌施工创造前置条件^[4]。

针对软岩大变形段, 以机械开挖过程中的监控量测数据为核心, 确定二次衬砌合理施作时机。通过自动化监测系统实时采集围岩收敛、拱顶下沉数据, 当围岩收敛速率小于 0.2 mm/d、变形趋于稳定后, 方可启动二次衬砌施工; 针对断层破碎带等不良地质段, 需缩短开挖进尺、加强初期支护, 必要时提前施作二

作者简介: 姚顺治 (1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路与桥梁。

次衬砌,避免围岩持续变形引发衬砌结构开裂。同时,严格控制机械开挖超欠挖,采用凿岩台车精准控制开挖轮廓,拱部 180° 范围平均超挖值控制在25 cm以内,最大超挖值不大于35 cm,从源头避免因欠挖侵占衬砌断面、超挖回填不密实引发的衬砌厚度不足、背后空洞等病害。

2.2 全工序机械化作业的流水衔接管控

依托全机械化配套设备优势,构建“开挖—支护—仰拱—防水—衬砌”五步流水作业体系,明确各工序机械化作业的时间节点与衔接要求。自行式仰拱拱桥实现仰拱施工与掌子面机械开挖的平行作业,确保仰拱封闭成环与掌子面开挖同步推进;防水板自动铺挂台车单循环作业时间控制在8 h以内,与仰拱施工形成紧密衔接;智能二衬台车单循环浇筑、养护周期与开挖支护循环进尺精准匹配,避免因工序脱节导致衬砌安全步距超标,同时杜绝为追赶开挖进度压缩衬砌施工养护时间的违规作业。

针对微瓦斯隧道施工特点,机械化作业各工序严格执行洞内动火审批、瓦斯浓度实时监测制度,衬砌施工电气设备全部采用矿用防爆型,防水板焊接、钢筋焊接等动火作业与掌子面机械开挖实施错峰作业,瓦斯浓度超标时立即停止所有作业、撤离人员,确保衬砌施工全过程安全可控。

3 机械化配套下二次衬砌核心工序质量控制要点

3.1 防水板机械化铺挂施工质量控制

防水板施工是二次衬砌防水体系的核心环节,采用自动铺挂台车替代传统人工铺挂,重点管控基面处理、土工布安装、防水板铺挂与焊接四大关键工序。衬砌施工前,采用三维激光扫描仪对初期支护断面进行全断面检测,欠挖部位彻底处理,切除锚杆头、钢筋露头,对基面凹凸部位采用喷射混凝土找平,确保基面平整度满足 $D/L < 1/6$ 的规范要求。

采用台车自动铺挂系统实现土工布与防水板的机械化展铺,土工布采用射钉加热熔垫固定,热熔垫片拱部间距0.5 m~0.7 m,边墙间距0.7 m~1.0 m;防水板通过台车液压顶升系统紧贴土工布,采用超声波焊机完成热熔垫圈与防水板的焊接,相邻防水板搭接宽度不小于100 mm,采用自动爬焊机进行双缝焊接。焊接完成后采用充气法进行焊缝密实性检测,充气压力0.25 MPa,保持15 min后压力下降小于10%为合格,杜绝焊缝漏焊、假焊引发的渗漏水病害。

3.2 钢筋工程机械化施工质量控制

钢筋采用洞外标准化加工厂集中数控加工,通过数控弯箍机、钢筋切断机实现钢筋下料、弯制成型的机械化作业,加工精度偏差控制在 ± 5 mm以内,严禁人工热弯作业。钢筋运输至现场后,采用台车作业平台辅助安装,遵循“先架立筋、后主筋、再分布筋”的顺序,环向主筋搭接位置错开布置,相邻主筋搭接错开距离不小于1 m。

采用定制定位卡具、“L”型限位钢筋精准控制钢筋层距与间距,纵环向偏差不大于10 mm;采用梅花形布置的定制混凝土垫块控制钢筋保护层厚度,垫块间距不大于1.5 m。钢筋焊接作业严格执行动火审批制度,设置接火盘与防火棉,焊接完成后全面检查防水板完整性,发现破损及时修补。

3.3 智能二衬台车安装与定位质量控制

台车进场前完成厂内试拼与刚度校验,进场后参照《公路隧道施工技术规范》完成整机验收,重点检查模板平整度、接缝错台、液压系统、行走系统与附着式振捣器性能,验收合格后方可投入使用。台车累计完成1.2 km衬砌施工后,由厂家专业团队完成全面检查、校正与模板抛光,确保设备性能持续稳定。

台车就位前,完成上循环二衬环向施工缝凿毛、高压水清洗与界面剂涂抹,采用专用卡具固定中埋式止水带,确保中心线与施工缝重合。采用全站仪与激光定位装置精准控制台车中线与高程,衬砌断面轮廓较设计内轮廓增加50 mm~80 mm的预留变形量,抵消施工过程中的结构变形。台车就位后,按“先底部、后两侧、再拱部”的顺序对称紧固丝杆千斤顶,松开液压油缸,避免混凝土浇筑过程中油缸受力失稳;轨道基面坚实平整,两侧轨道设置夹轨器与防溜块,斜井段额外增设手拉葫芦限位。就位完成后逐一检查振捣窗、浇筑孔、注浆孔,确保启闭灵活、密封严密。

3.4 混凝土机械化浇筑与养护质量控制

混凝土采用拌和站集中拌制,罐车运输至现场,通过混凝土输送泵配合智能二衬台车分仓布料系统泵送入模,入模温度严格控制在 $5^{\circ}\text{C}\sim 32^{\circ}\text{C}$ 。浇筑过程严格执行“自下而上、左右对称、分层逐窗”的原则,从两侧边墙向拱顶依次浇筑,分层厚度不大于40 cm,左右两侧混凝土浇筑面高差不大于1.0 m,避免单侧浇筑导致台车偏压移位。

混凝土振捣采用插入式振捣器与台车附着式振捣器结合的方式,插入式振捣棒移动间距不大于作用半

径的 1.5 倍，振捣时间控制在 10 s ~ 30 s，以混凝土不再沉落、不出现气泡、表面泛浆为度，严禁漏振、过振；振捣窗浇筑至下沿 0.2 m 时及时关闭，严禁从振捣窗跨层下料。拱顶浇筑采用从低到高逐孔缓慢压注的方式，适当减缓泵送速度，每个浇筑孔压注不少于 3 次，同步启动附着式振捣器辅助振捣，浇筑完成后在混凝土初凝前完成拱顶带模注浆，通过预埋注浆管充填拱顶背后空隙，确保拱顶衬砌密实^[5]。

混凝土养护采用专用喷淋养护台车，在终凝 2 h 后启动喷淋养护，洞口 100 m 段养护期不少于 14 d，洞身段养护期不少于 7 d，洞内相对湿度大于 90% 时可停止洒水养护，低温环境采取保温保湿措施。

4 机械化施工中二次衬砌常见质量通病与防治措施

结合项目机械化施工实践，梳理出二次衬砌施工五大类常见质量通病，其核心成因与针对性防治措施详见表 1。

表 1 机械化施工下二次衬砌常见质量通病、成因及防治措施

序号	质量通病	核心成因	针对性防治措施
1	衬砌厚度不足	1. 机械开挖轮廓控制不当，欠挖处理不到位；2. 台车定位偏差，预留变形量不足；3. 初期支护变形侵占衬砌断面	1. 严控凿岩台车钻孔精度，衬砌前全断面扫描，彻底处理欠挖；2. 精准复核台车定位，预留合理变形量；3. 初支变形段先注浆加固，再开展衬砌施工
2	拱顶背后空洞	1. 拱顶浇筑顺序不当，内部空气无法排出；2. 混凝土和易性差，自流填充性不足；3. 带模注浆工艺落实不到位	1. 优化拱顶混凝土配合比，提升和易性；2. 采用逐孔压注浇筑工艺，设置排气管与溢浆孔；3. 严格落实混凝土初凝前拱顶带模注浆
3	混凝土开裂	1. 水泥水化热温差大，养护不到位；2. 围岩变形未稳定即施作二衬；3. 拆模时间过早，混凝土强度不足；4. 单侧浇筑导致台车偏压变形	1. 优化配合比降低水化热，严格执行养护制度；2. 以监控量测数据确定二衬施作时机；3. 严控拆模强度，非承重结构强度不低于 5 MPa；4. 严格执行左右对称浇筑工艺，杜绝单侧偏压
4	施工缝渗漏水	1. 止水带安装偏位、固定不牢；2. 施工缝凿毛、清洗不到位；3. 新旧混凝土结合不密实	1. 采用专用卡具固定止水带，确保位置居中顺直；2. 施工缝严格凿毛清渣，浇筑前涂刷界面剂；3. 优化接缝处浇筑工艺，加强振捣密实度
5	外观蜂窝麻面、错台	1. 混凝土振捣不当，漏振、过振；2. 模板清理、脱模剂涂刷不到位；3. 模板接缝密封不严，出现漏浆；4. 台车模板刚度不足，浇筑变形	1. 定人定岗负责振捣，明确作业标准；2. 模板使用前彻底打磨，均匀涂刷脱模剂；3. 模板接缝用密封条密封，错台控制在 1 mm 以内；4. 定期校验台车模板刚度，紧固连接件

为实现衬砌施工质量闭环管控，项目建立“班组自检、项目部复检、监理终检”的三检制度，明确各岗位质量职责，对防水板焊接、钢筋安装、混凝土浇筑等关键工序实行质检工程师全程旁站。二次衬砌施工完成后，采用地质雷达沿隧道纵向 7 条测线开展背部密实度与厚度检测，对检测发现的缺陷制定专项处理方案，严禁擅自修补，确保衬砌结构质量满足设计与规范要求。

5 结束语

本文依托川汶高速大店隧道、穆肃堡隧道全工序机械化施工实践，系统梳理了机械开挖模式下二次衬砌施工的协同管控要求，明确了防水板机械化铺挂、钢筋数控加工、智能台车定位、混凝土机械化浇筑全流程的质量控制技术要点，分析了机械化施工中常见质量病害的成因并提出了针对性防治措施。未来需进

一步研究智能化监测技术与衬砌施工的实时联动体系，探索隧道衬砌全生命周期智能化质量管控模式，持续提升公路隧道二次衬砌施工质量与结构长期安全性。

参考文献：

[1] 王德呈. 隧道施工过程质量控制与工艺优化: 以隧道二次衬砌施工为例 [J]. 中国品牌与防伪, 2025(04):116-118.
[2] 王法雁, 袁斌, 孟小军, 等. 隧道二次衬砌混凝土施工质量控制措施研究 [J]. 工程建设与设计, 2024(22):226-228.
[3] 赵一轩. 公路隧道二衬施工质量控制研究 [J]. 交通科技与管理, 2024,05(14):173-175.
[4] 林鑫隆. 高速公路隧道施工技术与管理 [J]. 散装水泥, 2024(03):136-138.
[5] 牟金猛. 高速铁路隧道二次衬砌质量控制及缺陷预防施工技术研究 [J]. 居业, 2024(05):80-82.