

隧道二衬台车洞内狭小空间拼装施工技术研究

符家铖, 胡 锐, 李硕贵, 陈松松

(广西路桥工程集团有限公司, 广西南宁 530200)

摘要 为解决隧道内部净空有限的条件下二衬台车传统拼装方法存在的空间受限、精度控制难度大以及作业效率偏低等问题, 本研究着力探索一种适宜洞内狭小空间使用的高效、精准的拼装施工技术。凭借两个隧道工程项目实例, 提出了台车模块化拆分以及减重的设计方法, 引入 BIM 技术来开展虚拟拼装以及测设工作, 同时对自下而上的连续流拼装工艺进行优化, 还要辅以严格的测控以及过程管控的相关工作。狭小空间内台车的快速、精准拼装得以实现, 拼装效率得到极大程度上的提升, 模板垂直度以及环缝错台等关键质量指标都契合甚至优于既定的控制标准。研究结果显示, 这项技术切实解决了洞内拼装的空间与精度之间的矛盾, 为类似条件下的隧道二衬施工工作提供了技术参考。

关键词 二衬台车; 模块化拼装; 狭小空间施工; BIM 测设

中图分类号: U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.002

0 引言

随着山区高速公路建设向纵深发展, 隧道工程常面临洞内净空受限、作业空间狭小的挑战^[1]。当二衬台车因运输条件限制必须在洞内拼装时, 传统工艺常遇到构件就位难、轴线控制精度低、施工干扰大等瓶颈, 严重影响施工质量与进度^[2]。为解决上述问题, 本研究依托实际工程, 引入模块化设计理念对台车进行结构优化, 并借助 BIM 技术进行施工模拟与精准测设。通过重构一套涵盖模块拆分、流程优化与精细管控的洞内拼装施工技术, 旨在实现台车在狭小空间下的高效、安全、高质量拼装。

1 工程概况

1.1 工程背景与隧道基本参数

本研究依托两大工程实践: 一是广西百色市田林至西林高速公路 K42+100 ~ K43+300 段隧道, 二是 G7611 西昌至香格里拉高速 TJ3 标的斜井工区^[3]。田西高速隧道位于低中山地形, 围岩为弱风化砂岩与泥岩互层, 设计单洞双车道, 全长约 1 200 m, 洞内净宽 10.5 m、净高 7.8 m, 复合衬砌使施工净空进一步压缩, 构成典型狭小空间, 断面关键尺寸见图 1。而西香高速 TJ3 标斜井工区则更具代表性, 该工区二衬台车必须通过斜井运输至主洞后进行拼装, 这直接决定了洞内拼装工艺的必然性^[4]。鉴于工期与交通转换节点约束, 项目把二衬台车在洞内实施模块化拼装作为主要路径, 在

有限净空内组织模板支立、台车行走与连续浇筑的衔接。需重点关注的是, 轴线控制、拱墙至仰拱线形一致性与模板拼缝严密度直接影响衬砌成型质量; 同时, 混凝土供应节拍与台车循环步距要与洞内运输组织耦合, 以获得稳定的周转效率^[5]。结合 G7611 西昌至香格里拉高速 TJ3 标斜井工区 6 人拼装班组耗时 9 天完成台车拼装的实地管理经验, 本节界定工程尺寸边界与施工精度需求, 为后续工艺与质量控制提供参数依据。

1.2 洞内狭小空间拼装施工难点分析

鉴于洞内净宽 10.5 m、净高 7.8 m 且复合衬砌压缩净空, 将二衬台车在洞内实施模块化拼装面临空间、环境与精度叠加制约。空间限制集中在拱脚与仰拱钢筋、管线占道, 导致起重机回转半径不足; 构件在纵坡下就位易失稳, 对位与销接受变截面约束。尤其在西香高速斜井工区, 台车构件需经狭长斜井运输至洞内, 进一步限制了单次运输构件的尺寸与重量。在环境方面, 照度不足与通风受限叠加车辆排放; 盲区与粉尘干扰并存, 电缆与风筒交叉压缩通行与指挥空间; 运输波动打断拼装节拍。在精度方面, 轴线、线形与拼缝严密度需在受限工位同步控制; 台车轨距误差累积放大, 模板垂直度误差应 ≤ 5 mm, 否则易出现环缝错台、漏浆与拱背不圆顺^[6]。结合 G7611 西昌至香格里拉高速 TJ3 标斜井工区经验, 上述难点把吊装组织、测设复核与混凝土供应节拍耦合到同一路径, 协调不到位将转化为周转效率与衬砌质量的损失。

作者简介: 符家铖 (1998-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 隧道施工技术。

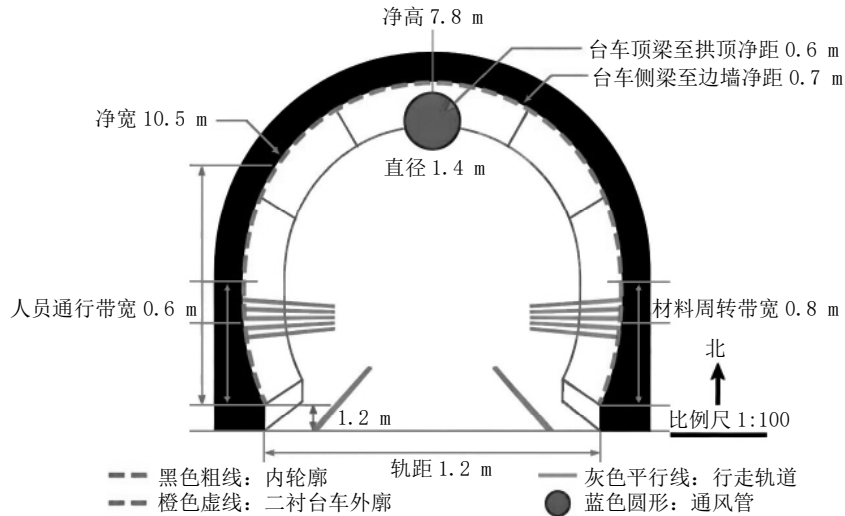


图 1 隧道洞内空间尺寸示意图

2 隧道二衬台车洞内狭小空间拼装关键技术

2.1 台车模块化拆分与优化设计

鉴于田林至西林高速 K42+100 ~ K43+300 段隧道净空与运输组织的双重约束，并充分考虑西香高速 TJ3 标斜井运输对构件尺寸的限制，本研究把二衬台车进行五单元模块化拆分与构件减重设计，分别为左侧模单元、右侧模单元、顶模单元、门架与行走支撑单元、端模与封堵单元，单元最大外廓宽度控制至 3.0 m，单元长度优先取 4.0 m 以适配弯道掉头需求，单元自重限定不高于 8 t 以匹配洞内 16 t 级车载起重机的额定工况。侧模与顶模采用 12 mm 钢板面叠合纵肋—横肋布置，肋高 100 mm 且间距 300 mm，门架采用箱形截面并把行走机构与液压系统进行一体化布置，轨距取 2.0 m 以让出施工通道。结合 TJ3 标图纸与孔位布置经验，吊点采用四点对称可调耳板布局，预留 ±20 mm 柔性调整量。

为在吊装选型约束下把单元自重控制在 8 t 以内，提出基于体积与材料密度的快速估算方法，公式如下：

$$W = V \times \rho \quad (1)$$

式 (1) 中， W 表示单元自重 (单位: t)； V 为单元构件的实体体积总和 (单位: m^3)； ρ 为所选材料的名义密度取值，钢材取 $7.85 \text{ t}/m^3$ ，复合部位按等效密度折算 (单位: t/m^3)。

从连接与对位角度来看，模块连接界面选用楔块快锁与定位锥套的复合构造，并将锁扣中心距统一到 500 mm 以实现工装标准化；锁扣承载能力设计为不低于 120 kN，同时在纵坡条件下增设燕尾导向滑块以抑制就位侧向摆动。为提高轴线控制精度，门架跨向设置双联可调拉杆，顶模节段间引入凸榫—沉孔的环向

定位单元，使模板环缝错台控制在 5 mm 以内；行走支撑选用双液压同步顶升系统，提供 ±15 mm 高程微调能力并兼顾纵坡补偿。

2.2 狭小空间内台车拼装工艺流程优化

针对田西高速隧道净空受限与西香高速斜井运输工况，将二衬台车拼装重构为由下至上、由主及次的连续流路径，设置单元进场、定位放线、门架与行走支撑安装、顶模吊装、侧模拼装、附属结构安装、精度微调与工序验收八个节点。进场采用车队化编组与倒序入洞策略，优先落位门架以形成稳定作业面；定位放线结合 BIM 模型与实测轴线，输出吊点与轨距坐标，现场采用激光投线与棱镜复核闭合，减小累计误差。

顶模安装是拼装环节的瓶颈，把其吊装工作纳入 BIM 模拟环节，借助预设吊孔、钢棒、拱顶滑轮以及挖掘机组成起吊系统，来实现精准就位的目标。精度调整阶段依靠双液压同步顶升以及拉杆相互配合，对轨距、高程以及环缝开展三向微调工作，让高差以及错台在同一工位完成闭合。为量化优化的效果，选用提升率公式：

$$\eta = \frac{T_{pre} - T_{opt}}{T_{pre}} \times 100\% \quad (2)$$

式 (2) 中， η 表示拼装效率提升率，单位: %； T_{pre} 表示优化前单台车拼装总时长，单位: h； T_{opt} 表示优化后单台车拼装总时长，单位: h。优化后的流程节拍十分稳定，为后续的浇筑作业开展创造了有利条件。

2.3 拼装过程中的质量管控要点

针对 K42+100 ~ K43+300 段的净空以及线形双重约束，开展拼装质量管控的相关工作时，把测设控制、连接可靠性、过程停检三条主线当作核心来协同推进。测设控制选用全站仪以及激光定位仪联用的方式，沿

拱墙以及顶模每2 m布置测点来开展复测工作,垂直度误差借助下式进行计算:

$$\Delta v = |v_{act} - v_{des}| \quad (3)$$

式(3)中, Δv 表示模板垂直度误差(单位: mm); v_{act} 为实测垂直度读数(单位: mm); v_{des} 为设计垂直度控制值(单位: mm)。

控制要求 $\Delta v \leq 5$ mm,把轨距控制在 $2.0 \text{ m} \pm 3$ mm 以内,轴线误差要在单节段内完成闭合。开展连接可靠性的管控工作时,把楔块快锁以及定位锥套扭矩管理当作核心,高强螺栓终拧扭矩 $\geq 300 \text{ N} \cdot \text{m}$,按照对角交替的方式施拧并且进行复核。导向滑块接触率 $\geq 70\%$,对吊点耳板以及关键焊缝开展磁粉或者超声抽检工作。

3 洞内狭小空间样装施工技术应用效果分析

3.1 施工效率对比分析

针对 K42+100 ~ K43+300 段的狭小空间约束,把二衬台车拼装作业进行重构,调整为连续流模式,以

模块标准化以及节点节拍控制为核心,有效开展非生产等待时长的压缩工作。完成优化后,单台车拼装总时长从 72 h 降至 48 h,月均二衬施工长度从 150 m 提升至 220 m。效率提升的主要缘由囊括侧模对位和顶模就位的耗时缩短,以及快插接口减少接驳停顿、车队化倒序入洞降低倒运干扰。该结果与西香高速 TJ3 标 6 人 9 天完成拼装的实践高度契合。

吊装设备利用率随短节拍作业提高至 78%,借助调度耦合供应以及运输节律,拼装波动可以得到有效控制。线形一致性控制以及激光投线复核减少了返工时间,班组切换以及纵坡段穿插施工的过程中,循环节拍更趋稳定。当前施工能力上限已由装配组织环节转移至供料以及浇筑环节,拼装对全线周转的牵制效应在极大程度上显著减弱(见表 1)。

3.2 质量验收结果评估

针对 K42+100 ~ K43+300 段,在统一验收口径下对二衬成型质量开展系统评估。在几何精度方面,模板

表 1 施工效率对比表

指标	统计口径	优化前	优化后	变化幅度
单台车拼装总时长	从进场至工序验收完成	72 h	48 h	降低 33.3%
月均完成二衬施工长度	按单洞双车道计	150 m	220 m	提升 46.7%
侧模拼装工序时长	侧模对位至锁扣封闭	18 h	12 h	降低 33.3%
顶模单元吊装时长	顶模起吊至合拢到位	16 h	10 h	降低 37.5%
吊装设备有效利用率	吊装作业占设备开机时间比例	62%	78%	提高 16%

垂直度误差 ≤ 4 mm(控制目标 5 mm),轨距偏差控制在 $2.0 \text{ m} \pm 2$ mm(目标 ± 3 mm),轴线偏移 ≤ 3 mm,环缝错台 ≤ 3 mm(目标 5 mm),各项指标均优于控制目标,形成可靠裕度空间。在外观与致密性方面,二衬混凝土表面平整度合格率达 98%,无蜂窝麻面、漏浆等缺陷,端模封堵与环缝密封连续完整,接茬搭接 ≥ 100 mm。得益于软搭接技术,传统刚性搭接引发的漏浆与错台通病得到有效治理。楔块快锁与定位锥套复合连接收敛拼缝间隙,双液压同步顶升与拉杆联动实现三向微调,激光投线与棱镜闭合将轴线误差截断于节段内,形成从装配界面到线形控制的闭环。快插接口功能试通后浇筑,从源头抑制渗漏与错台风险,拆模后无二次校正,成型质量与线形一致性契合控制目标。

4 结束语

本研究系统阐述了隧道二衬台车在洞内狭小空间的模块化拼装施工技术,通过将台车合理拆分、优化拼装流程并引入 BIM 等数字化测控手段,有效破解了空间限制与精度控制的双重难题,实现了施工效率与成型质量的同步提升。实践证明,该技术方案具备良

好的可行性与推广价值。限于工程个案差异,后续研究可进一步探索不同断面类型下模块化设计的通用性,以及基于智能化监测的动态拼装精度调控方法,以持续推动隧道施工技术的精细化发展。

参考文献:

- [1] 任裕廷,朱宇,管文博.组合式模板台车在隧道衬砌施工中的应用[J].砖瓦,2022(05):155-157,160.
- [2] 中铁五局集团路桥工程有限责任公司.一种用于洞桩法隧道二衬施工的多用途分离式台车:CN20221153040.2.3[P].2023-04-18.
- [3] 王怀杰,梁立凯.山区高速公路隧道二衬台车洞内组装技术探讨[J].城市建筑与发展,2024,05(08):76-80.
- [4] 姚研究.智能衬砌台车在超大断面二衬施工中的应用[J].山西建筑,2024,50(11):160-163,175.
- [5] 陕西路桥集团有限公司.一种隧道洞内二衬台车断面改装方法:CN202210227530.4[P].2024-10-29.
- [6] 滨海锋,秦鲜卓,黄祯尹.山区公路隧道机械化施工技术效果分析[J].西部交通科技,2025(08):172-175.