

超大跨度隧道三次衬砌施工质量控制关键技术及应用

刘涛*

中铁十六局集团第三工程有限公司, 浙江 湖州, 313000

摘要: 随着隧道工程向超大跨度方向发展, 三次衬砌施工质量控制成为确保结构安全与耐久性的关键。本文以厦门巷东隧道为工程背景, 针对传统二次衬砌施工中存在的防水层铺设效率低、拱顶混凝土脱空等质量通病, 提出了多功能防水板挂布台车及新型衬砌分层浇筑台车的创新技术。通过研发具有防溜坡、电缆有序收放功能的防水板台车, 显著提升了防水层施工的安全性及效率; 结合分层浇筑台车的逐窗入模布料系统、防脱空预警系统及钢端模定位模块, 有效解决了混凝土离析、拱顶空洞等问题。工程应用表明, 上述技术可实现三次衬砌施工质量的精细化控制, 衬砌施工效率提升了 22%, 减少返工率 30%, 节约工期 15%, 为同类工程提供了重要参考。

关键词: 三次衬砌; 施工质量控制; 防水板台车; 分层浇筑台车; 防脱空预警; 超大跨度隧道

Key Technologies and Applications for Construction Quality Control of Triple-Layer Lining in Super-Large Span Tunnels

Tao Liu*

China Railway 16th Bureau Group 3rd Corporation Limited, Huzhou Zhejiang, China ,313000

Abstract: With the development of tunnel engineering toward super-large spans, the quality control of triple-layer lining construction has become critical to ensuring structural safety and durability. Taking Xiamen Xiangdong Tunnel as a case study, this paper addresses common quality issues in traditional secondary lining construction, such as low efficiency in waterproof layer installation and concrete voids at arch crowns. Innovative technologies are proposed, including a multi-functional waterproof membrane laying trolley and a novel stratified lining pouring system. The waterproof membrane trolley, equipped with anti-slip mechanisms and cable management systems, significantly enhances construction safety and efficiency (up to 22% improvement in workflow). The stratified pouring system integrates a window-by-window concrete pouring system, a void prevention warning system, and steel-end-formwork positioning modules, effectively resolving concrete segregation and arch crown voids. Engineering applications demonstrate that these innovations enable precise quality control, achieving a 30% reduction in rework rates and shortening project timelines by 15%. This study provides valuable insights for optimizing construction methodologies in similar large-span tunnel projects.

Keywords: Triple-layer lining; Construction quality control; Waterproofing membrane hanging trolley; Stratified pouring trolley; Anti-void early warning; Super-large span tunnels

由于新奥法的推广, 复合衬砌结构广泛地被用于隧道工程建设。复合衬砌一般由初期支护、二次衬砌构成, 即在隧道土体开挖以后, 及时施作锚杆以及喷射混凝土等作为初期支护, 以控制围岩

变形和承受施工荷载；待围岩变形基本稳定以后，再施作二次衬砌。有的文献将两层初期称为初期支护及二次衬砌，则最后一层永久性衬砌结构则称为三次衬砌。

为了确保隧道衬砌快速安全施工，国内工程人员及学者进行了一些研究。贺立新等人以双向八车道特大跨隧道巷东隧道为依托，介绍了隧道施工过程中开挖工法优化及新工艺技术的应用^[1]。沈跃辉以厦门某双洞八车道隧道为依托，建立三维数值分析模型，并结合现场实测数据，研究衬砌结构受力特征以及二次衬砌荷载分担比^[2]。李武伦等人为解决传统钻爆法施工隧道时存在机械化程度低、施工人员劳动强度大、施工进度缓慢等问题，提出了一套适用于钻爆法施工隧道的工装配套技术及工序标准化控制方案^[3]。孔军豪结合汉十高铁武当山隧道群施工项目，主要针对隧道开挖支护台架、仰拱台车、二衬台车、槽道组装定位台架等。通过对以上施工工装优化改造的研究和工程实践，有效提高了施工效率和施工质量^[4]。戴光耀等人以京沈高铁高丽营隧道为工程背景，分别采用荷载结构法和地层结构法开展数值模拟，探究浅埋软弱围岩隧道超前管幕的力学机理^[5]。许逢寿等人论述京珠高速公路粤境北段隧道工程设计、施工状况及施工中遇到的软弱围岩、断层破碎带、滑坡段、溶洞等不良地质所采用的合理措施^[6]。

随着隧道工程向超大跨度方向快速发展，衬砌结构安全性与耐久性控制面临严峻挑战。工程实践表明，在三次衬砌施工中普遍存在三大质量通病：（1）钢边止水带受模板挤压易产生纵向偏移与环向扭曲，定位合格率不足；（2）防水板传统人工铺挂效率低下，且临时用电安全隐患突出；（3）拱顶混凝土脱空率高，后期注浆修复成本大。针对上述技术瓶颈，本文提出一种超大跨度隧道三次衬砌施工方法，通过研发双棘齿板互锁机制和电缆有序收放系统，实现防水层高效铺设与施工安全性的双重提升的多功能防水板挂布台车，和集成逐窗入模布料、防脱空预警及钢端模定位模块的新型衬砌分层浇筑台车，创新构建分层浇筑-实时监测-精准注浆的闭环工艺体系。工程实证表明，该工法使防水板施工工效提升 20%，拱顶密实度合格率达 100%，衬砌施工综合工效提升 22%。

1 工程背景

1.1 工程简介

巷东隧道是厦门市翔安机场高速公路的关键控制性工程。左洞长约 890 米，右洞长约 900 米，全线按设计速度为 100km/h 的双向八车道高速公路标准设计，隧道单洞建筑限界净宽 18.50m，净高为 5.0m。隧道开挖后最大高差达 14.27m，最大宽度达 22.18m。隧道洞身暗挖段衬砌按“新奥法”原理进行设计与施工，设计中考虑充分发挥围岩的自承能力，采用柔性支护体系的复合式衬砌结构，即以锚杆、钢筋网、喷射混凝土及型钢拱架等作为初期支护和第二层初期支护，C35 钢筋混凝土作为三次衬砌，共同组成永久性承载结构。

1.2 施工难点

在巷东隧道的施工过程中，考虑采用传统衬砌端头模施工方法存在以下主要问题：

（1）巷东隧道单洞为四车道隧道，衬砌浇筑一模方量达到 250 立方米，对衬砌台车制作采用的材料和吨位有严格要求，衬砌搭接设计采用钢边止水带，钢边止水带重量大刚性强的特性，使得止水带安装时不易弯折定位困难，止水带安装效果将直接影响衬砌施工缝防水功能。

（2）在防水层铺设过程中，难以实现机随人走，连续性和连贯性作业，快速、准确地实现防水

板、土工布卷材的安装,且安全防护设施较少,难以保证工作人员的安全,且其在工作时,电缆线散而乱,从而引发安全事故。因此,有必要针对防水层的铺设设备进行研发,提高铺设效率及安全性。

(3) 在永久性衬砌结构混凝土浇筑过程中,拱顶背后的空洞及脱空现象为隧道质量通病,在台车设计过程中,考虑浇筑二衬拱顶混凝土时由于工人观察失误、泵送料不及时等原因造成拱顶混凝土浇筑不密实,从而产生空洞脱空现象。

2 施工准备

本文以厦门巷东隧道为工程依托,项目科研团队聚焦三次衬砌施工中的关键技术难题,提出以下创新解决方案:

(1) 研发多功能防水板挂布台车,通过双棘齿板互锁机制和电缆有序收放系统,实现防水层高效铺设与施工安全性的双重提升;

(2) 研发新型衬砌分层浇筑台车,集成逐窗入模布料、防脱空预警及钢端模定位模块,攻克混凝土离析与拱顶空洞难题;

(3) 研发钢端模与纵向止水带定位夹具组合系统,解决施工缝处止水带偏移与混凝土外观缺陷问题。

3 施工流程及操作要点

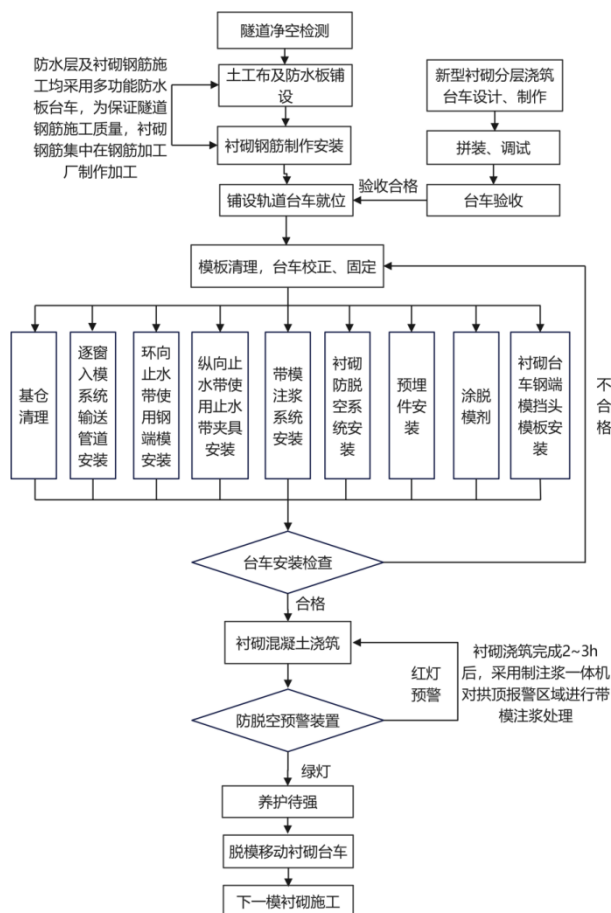


图1 超大跨度隧道三次衬砌施工流程图

Fig. 1 Construction Flow Chart of Third Lining for Super-large Span Tunnel

4 施工要点

4.1 多功能防水板台车

传统的防水板挂布台车难以实现机随人走,连续性和连贯性作业,快速、准确地实现防水板、土工布卷材的安装,且安全防护设施较少,难以保证工作人员的安全,且其在工作时,电缆线散而乱,从而引发安全事故。

项目科研团队联合台车厂家设计研制一种多功能防水板挂布台车,辅助机构通过第一棘齿板与第二棘齿板进行相互抱死,从而阻止装置溜破,且可进行相互替换工作,提高安全性能,调节机构通过清理夹板带动电线在收线辊的外表面进行往复运动,从而防止缠绕在收线辊外表面的一处,达到有序收放,避免电线散而乱,从而引发安全事故,还通过多个限位弹簧复位的弹力,带动十字限位板活动嵌设进入连接杆中,从而将角度进行固定,达到方便进行调整。

多功能防水板挂布台车通过辅助机构的双棘齿板互锁机制和调节机制的电缆有序收放系统,实现防水层高效铺设与施工安全性的双重提升,以解决上述背景技术提出的问题。多功能防水板挂布台车包括底座,底座的顶部设置有辅助机构,辅助机构的外表面设置有调节机构。多功能防水板挂布台车立体结构示意图见图2。多功能防水板挂布台车在超大跨度隧道衬砌施工应用见图3。

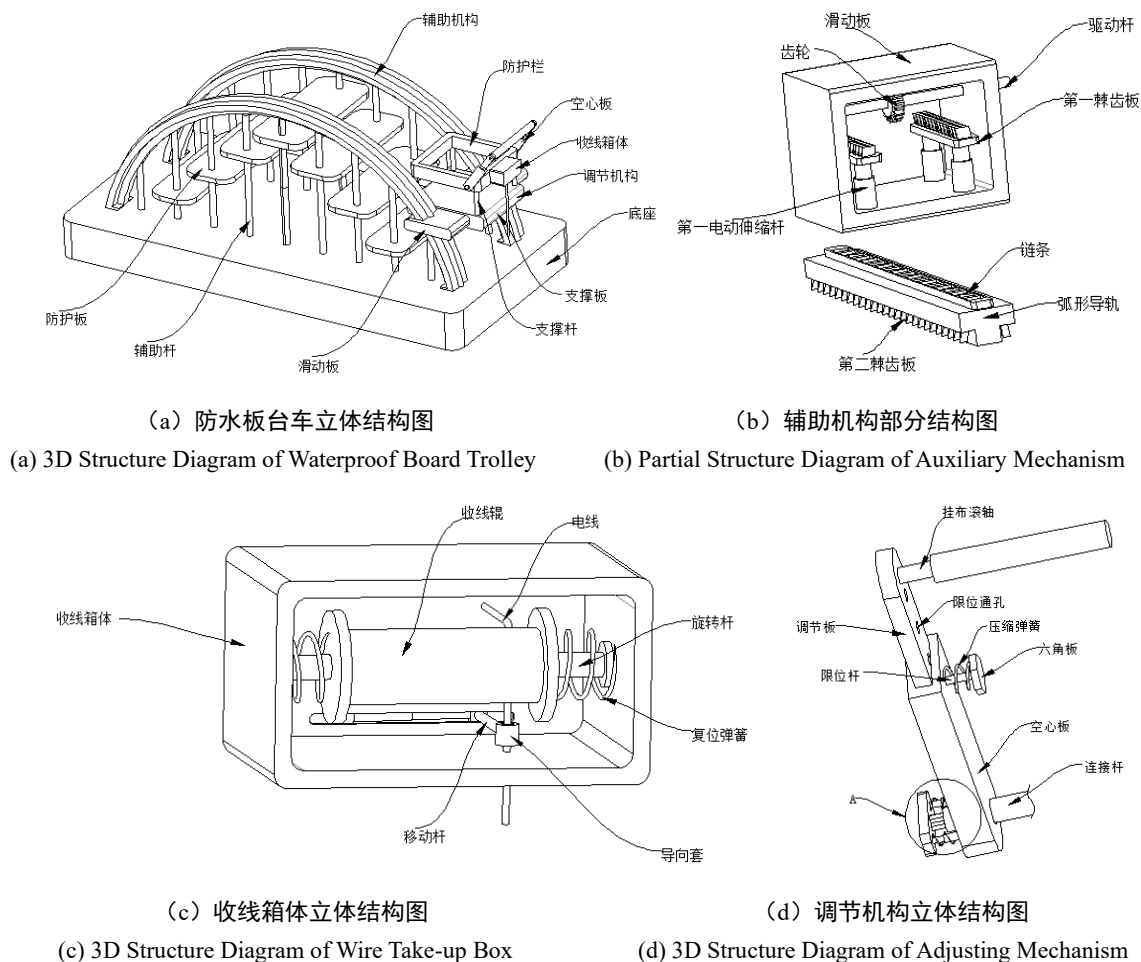


图2 多功能防水板挂布台车立体结构示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of 3D Structure for Multi-functional Waterproof Board Lining Trolley

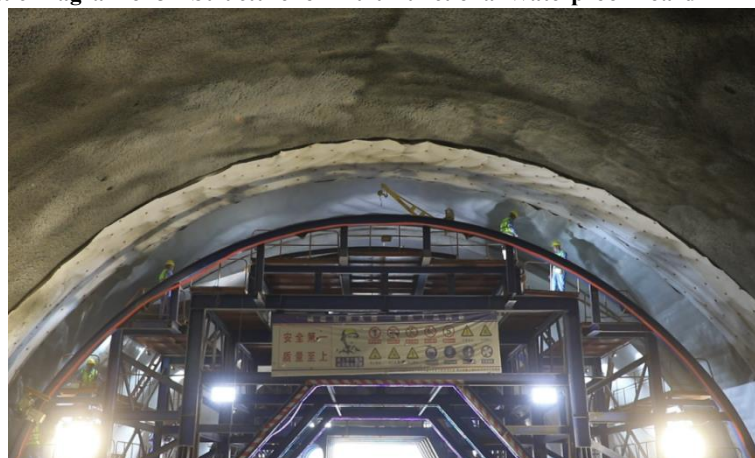


图 3 多功能挂布台车进行隧道衬砌防水层作业

Fig. 3 Operation of Multi-functional Lining Trolley in Tunnel Lining Waterproof Layer Construction

4.2 新型衬砌分层浇筑台车

本项目科研团队研发一种新型衬砌分层混凝土浇筑台车，主要由行走机构总成、门架总成、模板总成、电器操作控制系统、液压系统五大部分组成。

为了提高衬砌混凝土的浇筑质量，新型衬砌分层浇筑台车配备有防脱空预警系统、拱顶带模注浆系统、浇筑逐窗入模系统、钢端模与纵向止水带定位夹具组合模块系统。

新型衬砌分层浇筑台车采用逐窗入模布料系统，通过主料斗、主溜槽、“三通”分流槽、分流串筒和入窗溜槽结合的方式，简单操作相应的插板阀门，使混凝土流向各工作窗口，实现二衬拱墙混凝土的逐窗进料浇筑。安装顶平台主料斗、主溜槽、“三通”分流槽、分流串筒。安装各级窗口分滑槽导引至各工作窗口见图 4。

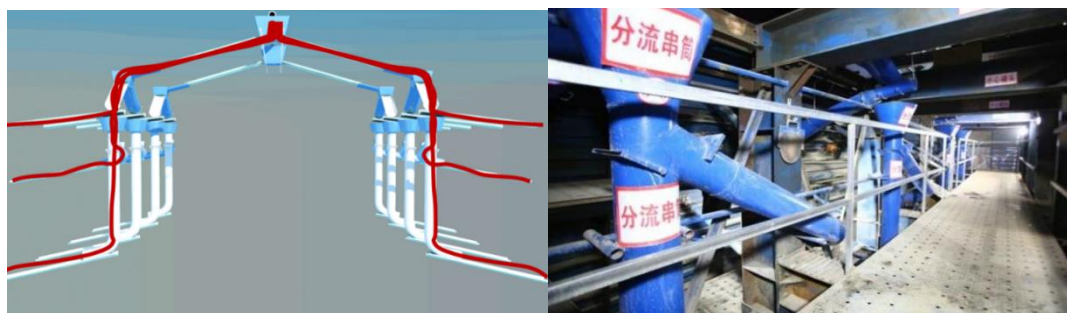


图 4 各级窗口分滑槽导引至各工作窗口

Fig. 4 Guidance of Diversion Chutes from Windows at All Levels to Each Working Window

通过抽插挡板开关调节，实现分级逐窗进料，见图 5。

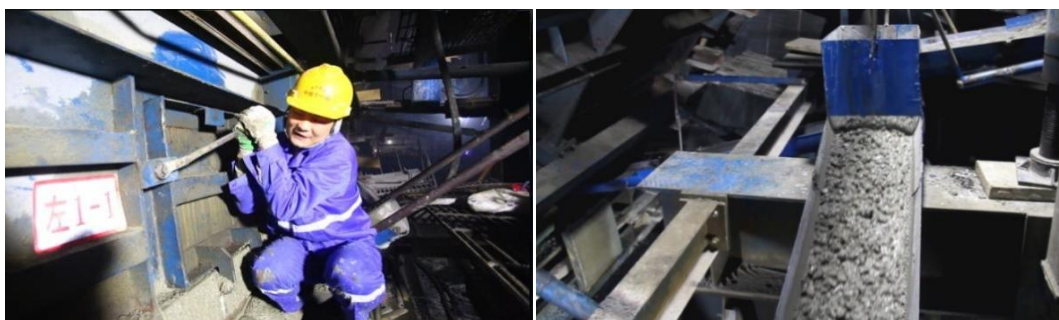


图 5 抽插挡板开关调节分级逐窗进料

Fig. 5 Adjustment of Pull-out Baffle Switch for Graded Sequential Window Feeding

4.2.1 衬砌防脱空预警与拱顶带模注浆系统

衬砌拱顶背后的空洞及脱空现象为隧道质量通病，在台车设计过程中，考虑浇筑二衬拱顶混凝土时由于工人观察失误、泵送料不及时等原因造成拱顶混凝土浇筑不密实，从而产生空洞脱空现象。

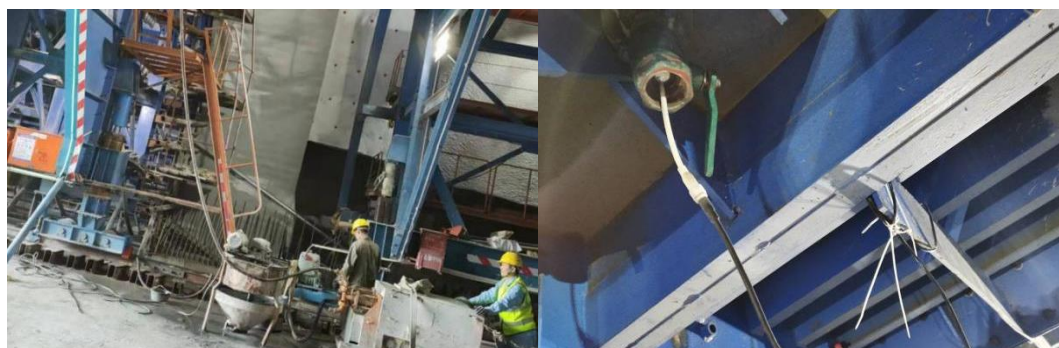
新型衬砌分层浇筑台车配套挤压密实感应器，原理和压力感应器类似，机器由感应带和感应器两部分组成，感应带一节长度与二衬一模长度相同，预埋在隧道洞顶中线防水板位置，并密贴牢固，感应带接触面与二衬混凝土相接，感应器通过与感应带连通工作，由于混凝土浇筑时会产生压力，感应带位置正好密贴防水板，当混凝土浇筑到拱顶防水板位置就会对感应带产生挤压力，当作用出效果时说明混凝土浇筑到达了拱顶防水板位置，此处的衬砌厚度合格，并感应器上工作且显现出为绿灯，感应灯为红灯时说明此处感应带未受到挤压力，衬砌厚度不合格，并要及时对其处理。感应器为 4 个感应灯。根据感应灯工作状态及时对相应部位进行处理。新型二衬分层浇筑台车防脱空预警系统照片见图 6。



图 6 新型衬砌分层浇筑台车防脱空预警系统

Fig. 6 Novel Anti-void Early Warning System for Layered Casting Trolley in Lining

新型衬砌分层浇筑台车已设计预留了带模注浆孔，能在浇筑过程中及时解决拱顶混凝土浇筑不密实产生空洞的现象。拱顶带模注浆系统现场照片如图 7 所示。



(a) 拱顶带模注浆 (b) 液位继电器感应装置与报警器连接
(a) Vault In-formwork Grouting (b) Connection of Liquid Level Relay Sensing Device and Alarm

图 7 新型衬砌分层浇筑台车拱顶带模注浆系统

Fig. 7 Novel Vault In-formwork Grouting System for Layered Casting Trolley in Lining

4.2.1 钢端模与纵向止水带定位夹具模块系统

传统隧道衬砌端头模施工时固定止水带位置采用的是钢筋定位卡及木模组合施工，由于巷东隧道采用的是钢板橡胶止水带，质量重不易弯折且止水带位置难以居中，采用木模封闭衬砌端头浇筑后，施工缝混凝土面不平整外观质量差。针对隧道环向、纵向施工缝定位困难的问题，通过改进止水带定位夹具辅助止水带安装。钢端模与衬砌台车弧形模板焊接固定牢固，比传统的木模封闭端头相比，节省了端头木模封闭时间，从而节约人工成本，提高了施工工效。

新型衬砌分层浇筑台车钢端模与纵向止水带定位夹具模块系统现场照片见图 8。巷东隧道衬砌施工应用钢端模与纵向止水带定位夹具组合模块系统后，拆模后混凝土外观见图 9。



(a) 纵向止水带定位夹具 (b) 钢端模模块
(a) Longitudinal Waterstop Positioning Fixture (b) Steel End Formwork Module

图 8 钢端模与纵向止水带定位夹具模块系统

Fig. 8 Steel End Formwork and Longitudinal Waterstop Positioning Fixture Module System



图 9 三次衬砌混凝土拆模后混凝土外观图

Fig. 9 Concrete Appearance Diagram of Third Lining after Form Remova

4.3 实施效果分析

4.3.1 施工工效对比

巷东隧道左洞衬砌施工采用传统技术方案，右洞衬砌施工采用多功能挂布防水板台车和新型分层浇筑台车等优化后技术方案，现场技术人员对衬砌各工序施工时长统计分析，左右洞衬砌施工工效对比表见表 1。

表 1 左右洞衬砌施工工效对比表

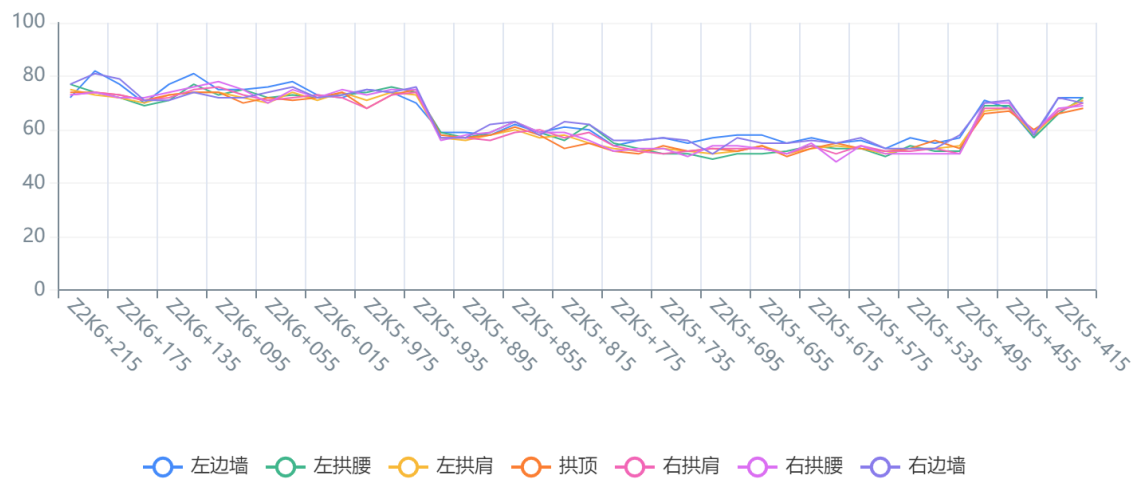
Table 1 Comparison Table of Lining Construction Efficiency between Left and Right Tunnels

	施工工序				
	每循环防水层施工时长（h）	每循环止水带安装及衬砌端头模安装时长（h）	工序转换更换台车时长（h）	每循环衬砌混凝土浇筑时长（h）	每循环衬砌施工总时长（h）
传统技术方案	15	10	2	14	41
优化后技术方案	12	8	0	12	32
施工效率提升百分比（%）	20	20	/	14	22

4.3.2 衬砌厚度合格对比

检测单位对巷东隧道工程进行交工验收前探地雷达检测。本次检测仪器采用 RIS-K2 地质雷达和 600MHz 地质雷达天线。检测测线沿隧道走向纵向布置，在每个隧道的拱顶、两侧拱肩、两侧拱腰、两侧边墙各布置一条连续的雷达探测剖面，共计 7 条测线。采用地质雷达法对巷东隧道衬砌混凝土厚度及缺陷情况进行检测。左右洞衬砌厚度检测结果见图 10。

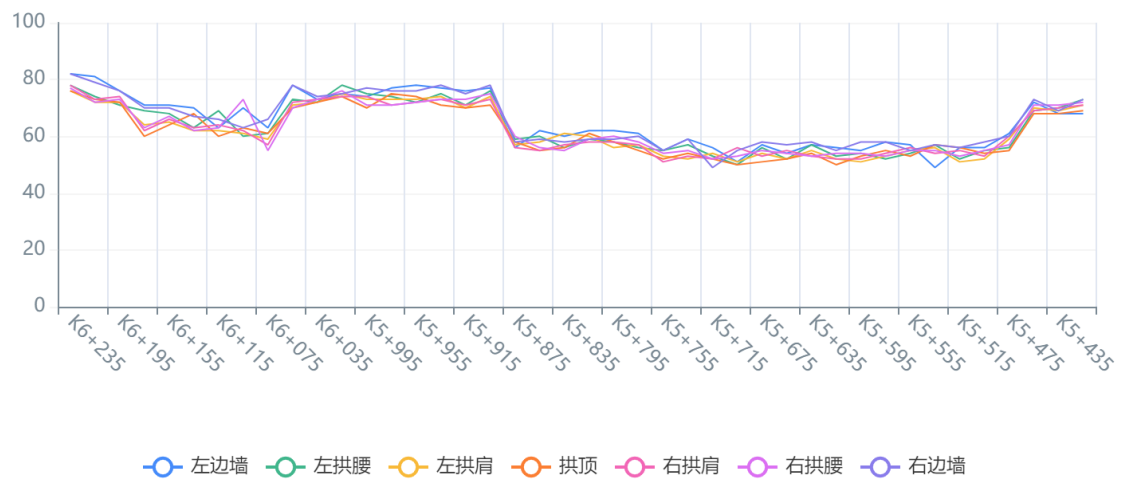
隧道衬砌厚度检测值趋势分析



(a) 左洞衬砌厚度检测数据分析图

(a) Data Analysis Diagram of Lining Thickness Detection in Left Tunnel

隧道各检测部位厚度变化趋势



(b) 右洞衬砌厚度检测数据分析图

(b) Data Analysis Diagram of Lining Thickness Detection in Right Tunnel

图 10 衬砌厚度检测结果

Fig. 10 Detection Results of Lining Thickness

左右洞衬砌各部位厚度合格率对比见表 2。

表 2 左右洞衬砌各部位厚度合格率对比图

Table 2 Comparison Chart of Thickness Qualified Rate for Various Parts of Lining in Left and Right Tunnels

	衬砌各部位厚度合格率 (%)						
	左边墙	左拱腰	左拱肩	拱顶	右拱肩	右拱腰	右边墙
巷东隧道左洞	100	95.24	100	95.24	97.62	97.62	100
巷东隧道右洞	97.62	100	100	100	100	100	97.62

5 结论

巷东隧道左洞衬砌施工采用传统技术方案,右洞衬砌施工采用多功能挂布防水板台车和新型分层浇筑台车等优化后技术方案,通过现场实测和统计分析,研究结论如下:

(1) 多功能防水板挂布台车,可以在防水层和三次衬砌施工工序上多功能使用,降低专项设备成本,并通过集成双棘齿互锁、弹性复位电缆收放系统及可调式安装结构,显著提升施工安全性与防水板安装效率,形成安全、高效、经济的隧道防水层施工解决方案。

(2) 逐窗入模布料系统,通过分层逐窗浇筑工艺有效消除混凝土离析、骨料堆积及冷缝缺陷,配合可重复滑槽体系显著提升衬砌边墙浇筑质量与施工效率,其模块化设计兼具经济性、操作便捷性和作业安全性,实现了混凝土浇筑工艺的精细化与标准化升级。

(3) 钢端模与纵向止水带定位夹具模块系统,通过定位夹具可避免止水带翻滚、扭结、不平展等现象,止水带安装位置准确,能保证中间空心圆与变形缝的中心线重合。有效解决了止水带在隧道环向、纵向施工缝定位困难的问题,浇筑拆模后衬砌端头混凝土面外观平顺。

(4) 衬砌施工中创新应用液位继电器实时监测拱顶混凝土浇筑密实度,通过数字化液位传感技术替代传统人工经验判断,有效避免拱顶脱空、蜂窝等质量缺陷,大幅度提升拱顶、拱肩等部位衬砌厚度合格率。

经计算分析后,优化后的技术方案衬砌施工效率提升了 22%,减少返工率 30%,节约工期 15%。

参考文献

- [1] 贺立新,丁念明,段小健,等.特大跨隧道施工中新工艺技术的运用[J].交通节能与环保, 2022, 18(04):170-173.
- [2] 沈跃辉. 超大跨度隧道衬砌结构受力特征分析[J]. 铁道建筑技术, 2024, (04):191-194.
- [3] 李武伦,蒋证全. 钻爆法施工隧道工装配套设计及工序标准化控制研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(06):210-217.
- [4] 孔军豪. 高速铁路隧道施工工装优化改造技术研究[J]. 智能城市, 2020, 6(11):184-185.
- [5] 戴光耀,孙宁新,彭龙,等. 浅埋软弱围岩隧道超前管幕施工力学行为分析[J]. 湖南交通科技, 2020, 46(01):95-99.
- [6] 许逢寿,陈宁青. 京珠高速公路粤境北段隧道工程施工工艺及不良地质段整治措施[J]. 辽宁师专学报(自然科学版), 2004, (01):70-73.
- [7] 孔文亚,周立新,王君楼.西昆高速铁路隧道衬砌施工质量控制关键技术[J].铁道建筑, 2024, 64(07):96-100.
- [8] 岳先龙. 高速铁路隧道衬砌施工质量控制关键技术研究[J]. 工程建设与设计, 2024, (08):184-186.
- [9] 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.
- [10] 安垒. 单线铁路隧道衬砌混凝土逐窗浇筑施工技术[J].中国水泥, 2025, (01):115-117.
- [11] 何万. 隧道衬砌钢筋双重控制定位卡具施工技术应用研究[J]. 工程技术研究, 2025,10(01):98-100.
- [12] 张锐. 隧道衬砌施工中自动化技术的应用与发展趋势研究[J]. 交通建设与管理, 2024, (06):100-102.

基金项目: 中铁十六局集团有限公司科技研发项目 (K2020-4B)

***第一作者和通讯作者:** 刘涛 (1993-), 男, 学士, 2015 年毕业于华东交通大学, 研究方向: 隧道工程。 E-mail: 610624429@qq.com