

寒冷地区铁路隧道冬期衬砌施工智能台车技术

李 斌

中铁二十二局集团第二工程有限公司 北京 100041

摘 要：针对寒冷地区铁路隧道冬期衬砌施工中低温致混凝土病害、设备失稳、人工效率低等核心难点，本文研发适配极端低温环境的智能台车技术，优化系统设计与施工工艺，集成精准定位、温湿度智能调控等关键技术，通过实验室测试与现场调试验证其可行性。实践表明，该技术可大幅提升施工效率与衬砌质量，降低安全隐患，解决传统施工局限性，为寒冷地区铁路隧道冬期衬砌施工提供可靠技术支撑与实践参考。

关键词：寒冷地区；铁路隧道；冬期衬砌施工；智能台车技术

引言：寒冷地区冬期低温、冻融循环等恶劣环境，给铁路隧道衬砌施工带来诸多挑战，混凝土强度发展迟缓、设备运行不稳定、质量管控难度大等问题，严重制约施工进度与工程耐久性。传统施工方式难以适配冬期复杂工况，亟需智能化技术突破。基于此，本文聚焦寒冷地区施工痛点，研发冬期衬砌施工智能台车，优化系统结构与施工工艺，旨在破解施工难题，推动隧道冬期施工智能化、标准化发展。

1 寒冷地区铁路隧道冬期衬砌施工核心难点分析

1.1 环境因素导致的施工难点

(1) 低温对衬砌混凝土性能的影响：冬期低温环境会显著减缓水泥水化反应速率，导致混凝土强度发展迟缓，无法按时达到设计强度要求，影响施工进度。同时，混凝土内部水分易冻结形成冰晶，破坏内部结构，易出现冻结、开裂等病害，后续冻融循环会进一步加剧结构损伤，降低衬砌耐久性，难以满足铁路隧道长期运营的安全需求。(2) 严寒环境对施工设备的影响：低温会使液压系统油液黏度增加，导致设备动作迟缓、响应滞后，电力系统启动困难，甚至出现故障。设备运行稳定性和作业效率大幅下降，不仅延误施工工期，还可能因设备故障引发施工质量问题的，增加施工成本和安全风险。

1.2 衬砌施工本身的技术难点

(1) 衬砌模板安装精度控制：冬期低温会导致模板材料收缩变形，拼接处易出现缝隙，难以保证模板安装的平整度和密封性，进而影响衬砌成型质量。若模板固定不牢固，浇筑过程中易出现跑模、错台等问题，导致衬砌表面凹凸不平，不符合设计标准，需进行返工处理。(2) 混凝土浇筑与养护难题：混凝土浇筑过程中，受低温影响温度损失过快，易出现离析、分层现象，影响混凝土密实度。养护阶段难以维持恒温高湿环境，混凝土表面水分快速蒸发，易产生表面起砂、裂缝、内部疏松

等质量缺陷，降低衬砌结构的承载能力和抗渗性能^[1]。

1.3 传统施工方式的局限性

(1) 人工操作效率低：冬期隧道内施工环境恶劣，低温、潮湿加剧人工劳动强度，人工安装模板、调控温湿度等作业效率低下，且操作精度难以保证，不仅影响施工进度，还易因操作失误引发安全隐患，威胁施工人员人身安全。(2) 质量控制难度大：传统台车自动化程度低，无法实时监测混凝土温度、模板垂直度等施工参数，难以实现衬砌施工全流程精准管控，质量波动较大，衬砌裂缝、蜂窝麻面等质量病害频发，增加后期维修养护成本。

1.4 冬期施工安全隐患分析

(1) 作业环境安全风险：隧道内低温、潮湿的环境易导致路面结冰，施工人员易滑倒受伤；同时，隧道内通风不畅，易出现有毒气体积聚，若检测不及时，可能引发人员中毒事故，威胁施工人员生命安全。(2) 设备运行安全风险：智能台车等施工设备在低温环境下易出现电路故障、机械卡滞等问题，若日常防护和检修不当，可能引发设备损坏，甚至导致施工中断、人员伤亡等安全事故，影响施工安全和进度。

2 寒冷地区铁路隧道冬期衬砌智能台车系统设计

2.1 智能台车总体设计思路

(1) 设计原则：严格遵循适应性、智能化、安全性、经济性四大核心原则，充分适配寒冷地区低温、冻融等恶劣环境，贴合铁路隧道衬砌施工的复杂工况，兼顾施工效率与工程质量。适应性聚焦低温环境下设备正常运行，智能化侧重施工全流程自动化管控，安全性保障设备与人员作业安全，经济性控制设备研发、制造及运维成本，实现四大原则有机统一。(2) 总体结构布局：采用门架式与模架一体式相结合的结构设计，兼顾结构稳定性与空间利用率，整体分为四大核心模块，即模板系

统、智能控制系统、动力系统、低温防护系统。各模块分工明确、协同工作,优化结构布局减少空间占用,便于隧道内灵活作业,同时强化模块间连接稳定性,确保低温环境下整体运行可靠,满足冬期衬砌施工的连续作业需求。

2.2 核心模块设计与优化

(1) 模板系统设计:选用耐低温高强度钢材及保温模板材质,有效抵御低温收缩变形,采用模块化拼接设计,便于快速安装与拆卸,降低人工劳动强度。配备可伸缩式定位装置,精准调节模板位置,大幅提升安装精度,同时增强模板拼接处密封性和整体保温性能,从根源上杜绝跑模、错台等质量问题,保障衬砌成型质量。(2) 智能控制系统设计:基于PLC智能控制技术构建核心控制体系,集成温湿度实时监测、模板精准定位、混凝土浇筑状态监测等多项功能,实现施工参数的实时采集、分析与调控,支持远程监控操作。操作人员可通过终端实时掌握施工动态,及时调整参数,减少人工干预,提升施工智能化水平和管控精度。(3) 低温防护系统设计:针对动力系统、液压系统、电气系统开展专项防寒保温改造,采用保温棉包裹、密封防护等措施,配备蒸汽加热、电伴热双重保暖装置,可根据环境温度自动调节加热功率,确保台车在-20℃的极端低温环境下,各系统无故障稳定运行,避免低温对设备造成损伤^[2]。

2.3 智能台车关键技术研发

(1) 精准定位技术:融合激光定位与光电传感技术,搭建双定位监测体系,实现模板安装的自动化精准定位,实时校准模板垂直度、平整度,将定位误差严格控制在规范允许范围内,有效解决冬期模板收缩导致的定位偏差问题,保障衬砌施工精度。(2) 温湿度智能调控技术:集成超声波雾化、工业级蒸汽发生装置,结合多点温湿度传感器,实时监测衬砌周围及混凝土表面的温湿度数据,当参数偏离最优范围时,自动启停加热、加湿设备,精准调控养护环境,维持恒温高湿条件,避免混凝土出现冻结、开裂等病害^[3]。(3) 数据采集与分析技术:搭建云端数据管理平台,实时采集施工过程中的混凝土温度、浇筑压力、浇筑方量、模板定位参数等关键数据,自动整理生成数据报表,实现施工过程全流程可追溯。通过数据分析及时发现施工隐患,为施工优化提供数据支撑,提升施工质量管控的科学性。

2.4 智能台车性能测试与调试

(1) 实验室性能测试:搭建模拟寒冷地区不同低温工况的实验环境,重点测试台车的模板定位精度、温湿度调控效果、各系统运行稳定性及低温适应性,模拟不

同冻融循环条件下的设备性能,排查潜在故障,优化设备参数,确保台车满足设计标准和施工需求。(2) 现场调试与优化:将研发完成的智能台车投入实际隧道工程进行试运转,结合现场冬期施工工况,收集施工反馈数据,针对模板安装效率、温湿度调控精度、设备运行稳定性等方面的不足,优化台车结构设计和控制参数,进一步提升台车的现场适配性和作业可靠性,为后续规模化应用奠定基础。

3 寒冷地区铁路隧道冬期衬砌智能台车施工工艺优化

3.1 施工前期准备工作优化

(1) 设备准备:智能台车进场后,重点开展全面检查与低温专项调试,逐一排查模板系统、智能控制系统、动力系统及低温防护系统的运行状态,及时处理部件松动、线路老化等问题。同步完成配套加热、保温设备的安装与调试,对电伴热装置、蒸汽发生器进行试运行,确保各设备协同工作,在低温环境下始终处于良好工作状态,为后续施工顺利开展奠定基础。(2) 材料准备:针对冬期施工特点,优化衬砌混凝土配合比,选用早强硅酸盐水泥加快强度发展,掺入聚羧酸系防冻剂,有效降低混凝土冰点,提升抗冻性能。骨料和拌合用水提前进行预热处理,控制骨料温度不低于5℃、拌合用水温度在10~20℃,避免低温材料影响混凝土拌合质量,确保混凝土浇筑后能抵御低温侵蚀,减少冻结、开裂等病害。(3) 现场准备:提前清理隧道作业面,清除杂物、积水及浮冰,避免影响模板安装和混凝土浇筑。在隧道作业区域搭设保温棚,采用防火保温材料密封,减少外界低温对作业环境的影响;优化通风系统,增加通风频次和时长,及时排出隧道内有毒气体,降低低温潮湿环境下路面结冰和气体体积聚的风险,保障作业环境安全。

3.2 智能台车衬砌施工核心工艺

(1) 模板安装与定位:充分利用智能台车的激光定位与光电传感双重自动定位功能,精准完成模板模块化拼接与固定,全程实时监测模板垂直度、平整度及位置偏差,数据同步传输至智能控制终端。若出现偏差,系统自动发出预警并辅助操作人员及时调整,确保模板安装精度符合规范要求,杜绝跑模、错台等问题。(2) 混凝土浇筑工艺:采用自动布料机带压入模方式,实行逐仓分层浇筑,控制浇筑厚度和速度,避免混凝土离析。严格控制混凝土入模温度不低于5℃,通过智能系统实时监测浇筑压力和浇筑方量,精准把控浇筑节奏,重点防范拱顶脱空问题,确保混凝土浇筑密实,提升衬砌结构的承载能力和抗渗性能^[4]。(3) 智能养护工艺:混凝土浇筑完成后,立即启动智能台车养护系统,采用全封闭气

囊对衬砌表面进行密封,减少温度损失。通过蒸汽加热装置和超声波雾化加湿装置,实时调控养护环境温湿度,维持恒温高湿条件,有效加快混凝土强度发展,缩短养护周期,避免混凝土表面起砂、内部疏松等质量缺陷。

3.3 冬期施工质量控制措施

(1) 混凝土质量控制:全程跟踪监测混凝土拌合、运输、浇筑全过程的温度,在拌合站、运输车辆、作业面设置多点温度监测点,确保各环节温度符合冬期施工标准。严格控制防冻剂掺量,按配合比精准计量,避免掺量不足影响抗冻性或掺量过高损害混凝土强度,确保混凝土最终强度和抗冻性能达标。(2) 衬砌成型质量控制:通过智能台车控制系统实时监测模板变形和衬砌厚度,浇筑完成后采用超声波无损检测技术,全面检查衬砌密实度,排查蜂窝、麻面、裂缝等施工缺陷。对发现的问题及时制定整改方案,限期整改并复核,确保衬砌成型质量符合设计要求,保障结构耐久性。(3) 施工过程安全控制:在隧道作业区域设置智能安全预警装置,实时监测隧道内温度、有毒气体浓度,当参数超出安全范围时,立即发出声光预警并联动通风、加热设备调整。规范作业人员操作流程,要求作业人员佩戴防寒防护用品,严禁违规操作,全方位防范安全事故发生^[5]。

3.4 施工工艺对比分析

(1) 与传统台车施工工艺对比:从多维度开展对比分析,施工效率方面,智能台车实现模板安装、浇筑、养护全流程自动化,大幅减少人工投入,施工效率较传统台车提升30%以上;质量控制方面,智能台车可实时监测施工参数,精准调控各环节工艺,质量缺陷发生率大幅降低,衬砌成型精度显著提升;劳动强度方面,自动化作业替代人工繁重操作,有效降低冬期恶劣环境下的

人工劳动强度,减少安全隐患;安全性能方面,智能监测与预警系统可及时排查安全风险,较传统台车施工安全性显著提升,凸显智能台车施工工艺的优越性。(2) 工艺优化效果评估:通过现场施工数据对比,优化后的智能台车施工工艺,混凝土养护周期缩短20%以上,衬砌质量合格率提升至98%以上,施工人员投入减少40%,安全事故发生率降至零。各项数据验证了优化后施工工艺在寒冷地区冬期衬砌施工中的适用性和有效性,能够有效解决冬期施工难点,兼顾施工效率、质量与安全,为寒冷地区铁路隧道冬期衬砌施工提供可靠的工艺支撑。

结束语

本文围绕寒冷地区铁路隧道冬期衬砌施工智能台车技术展开系统研究,明确施工核心难点,完成台车系统设计、关键技术研发及施工工艺优化,通过实践验证了技术的适用性与有效性。该技术有效解决了冬期施工中的温度管控、精度控制等难题,降低了劳动强度与安全风险。后续可结合更多极端工况优化设备性能,推动技术规模化应用,为同类工程施工提供更完善的技术借鉴与支撑。

参考文献

- [1]卢炜.寒冷地区高速铁路隧道内温度场变化特性及其影响[J].铁道建筑,2021,4(9):67-70.
- [2]李校珂.新型智能化隧道衬砌台车施工技术研究[J].施工技术,2020,9(1):100-104.
- [3]唐有全,段汝健,鲁兴安.机械化配套施工技术在某隧道中的应用[J].云南水力发电,2022,9(15):142-144.
- [4]袁枫杰,龚学亮,张洪.自动分仓布料在双线隧道衬砌施工中的应用[J].建筑机械化,2021,12(10):221-224.
- [5]陈耀华.高速铁路隧道智能化二次衬砌台车综合施工技术研究[J].建筑技术开发,2022,8(5):87-90.