

隧道标准化台车设计及衬砌施工安全管理措施

刘卫凤

(中交一航局第三工程有限公司)

摘要: 二次衬砌是隧道施工中的关键工序,主要采用衬砌钢模台车作为主要设备。考虑到衬砌台车类型较多,施工可重复性较差,且设计影响因素较多,易造成隧道二次衬砌施工质量较差。为此,开展衬砌台车标准化研究具有重要意义。基于常规隧道衬砌钢模台车进行面板材料、布料系统、钢端模改进、拱顶防脱空4大方面的标准化设计,并且就某隧道工程开展优化后的隧道衬砌台车施工安全管理应用分析。结果表明,标准化台车模板定位效率高,混凝土芯样内部无缺陷,尺寸厚度满足技术要求,质量优良。可为隧道工程类似项目施工管理提供参考。

关键词: 隧道工程;衬砌台车;标准化设计

0 引言

隧道工程作为交通基础设施的重要组成部分,多建设于山区、丘陵等复杂地形区域。公路隧道主要采取初期支护、二次衬砌复合式结构进行施工。隧道二次衬砌能够充分分担围岩压力,极大提升了隧道安全管理水平。二次衬砌主要在初期支护结构变形发展稳定之后进行,目前主要采取刚度、强度较高的衬砌钢模台车操作施工,能够改善隧道施工机械化水平,降低施工强度。但是,衬砌钢模台车存在重复利用性差、装配复杂、施工资源浪费等缺点,且多依据操作性难度、隧道荷载、尺寸及成本等因素进行设计,缺少一定的标准进行推广应用。因此,针对衬砌钢模台车进行标准化设计优化,能够改善隧道施工适应性,对于隧道施工安全管理也极其重要。

1 隧道衬砌钢模台车概述

衬砌钢模台车主要有平移式和拆装式2种类型。其中,拆装式台车需要设置多套模板,在混凝土浇注结束,拱架、台车分离后,及时进行下一段立模和混凝土浇注;平移式台车则只设置单套模板,通过固定台车、模板之间的连接,在上一段混凝土达到预定强度之后,则要拆模开展下一段的浇注施工。

衬砌钢模台车主要包括模板、台车、行走装置、托架、升降装置和操作装置6个部分。主体结构为模板、台车,托架上部设置的顶部模板和侧模通过螺栓固定,侧模可通过螺杆、丝杆进行

一定幅度的收张;行走装置主要包括被动、主动装置,主动装置发挥驱动台车行进作用,依靠电动机带动行走。衬砌钢模台车在隧道衬砌施工中极易造成衬砌质量不稳定,这主要由于浇注阶段混凝土的坍落度较大(10~25 cm),而衬砌混凝土在初凝过程中蒸发出来的水分难以在侧拱下半部分钢模弧线段有效排出去,这导致混凝土硬化后会在该处表面形成麻面、蜂窝、脱落等质量病害,继而引发生产安全事故^[1]。

2 台车标准化设计

2.1 面板材料的选择

衬砌钢模台车面板材料硬度、刚度及粗糙程度等性能参数对衬砌施工质量的影响较大。金属面板材料的硬度越大,其耐磨损性能也相对较好,周期性使用次数也较多;材料刚度越大,耐磨损能力也越强;材料粗糙程度越小,耐磨损性较好。常见的衬砌钢模台车面板材料主要包含Q235钢板、2 mm 不锈钢+10 mm Q235 复合钢板、12 mm 不锈钢板3种。其中,Q235钢板在同样厚度下具备相对较低的表面硬度,在隧道衬砌施工中容易出现一定程度的变形,为确保额定模板使用次数,需要考虑适当增大钢板面板尺寸、厚度,极易造成模板台车装配难度增大和施工进度的延迟。此外,Q235钢板材料也易在长周期的衬砌混凝土浇注过程中出现锈蚀,增加施工不稳定因素;2 mm 不锈钢+10 mm Q235 复合钢板的组合材料性能相对较好,材料表面硬度相较于Q235明显提高,该

材料也较难生锈，能够有效提升台车的整体刚度和稳定性。但在特殊隧道洞面下及日常维护阶段，表面 2 mm 不锈钢材料易出现损伤，造成维修频率较高、周转次数下降；12 mm 不锈钢板的稳定性则显著优于上述 2 种材料，该模板台车能够有效提升衬砌施工质量及进度，但是，由于该材料模板厚度增大会导致成本相对偏大，考虑到使用次数能够显著增加，其综合经济效益较高^[2]。

2.2 旋转布料及清洗

衬砌钢模台车配置的混凝土布料系统需要具备混凝土布料、回收、清洗等一系列功能。台车布料系统分配器能够自动旋转，内部设计环向封闭管路构造，通过压力泵送浇注混凝土。布料系统设置能够进行漏浆废料及清洗功能的支管，系统要衔接风管接口，能够对管路进行定时清洁。旋转布料采取液压遥控控制，配置 25 个管路接口（5 个为清洗口、20 个为混凝土浇注口），能够实现单层单侧 3 个工作面的混凝土浇注。

2.3 定型钢端模改进

常规的衬砌钢模台车模板固定存在较大的复杂性，且模板堵塞和密封性功能不足，极易出现混凝土漏浆、预埋件偏位等情况，造成模板端部混凝土衬砌质量相对较差。标准化设计采取内外侧钢模板均为 L 形，通过丝杆进行衔接固定的钢模板能够有效提升端部混凝土浇注均匀性和密实性，且现场钢模板装配较简单，施工缝防水效果良好。L 形钢端模需要通过螺栓和台车相互连接，内侧模板存在灵活的设计横向宽度（20~25 cm），能够满足隧道衬砌施工空间的要求；外侧模板则设计为 12~15 cm 宽度的活页钢板，与内侧钢板之间通过丝杆连接。为确保衬砌混凝土防水效果，将环状止水带布置在内外侧钢板之间，环状止水带通过丝杆、螺栓进行定位衔接。

2.4 拱顶浇注及防脱空措施

隧道拱顶位置的衬砌混凝土通过设置浇注孔进行浇注。拱顶位置的混凝土要满足密实性、均匀性的基本要求，浇注孔孔位一般设置在拱顶最高位置附近，台车顶部钢模要具备孔位设计功能。拱顶浇注口设计倾角为 45°，以便提升孔内混凝土饱满度；拱顶位置还需要进行脱空检测，即通过在钢模板背部设置压密传感带（传感器布置间距 750 mm）实现，衬砌混凝土浇注至隧道拱顶最高区域时，当混凝土浇注达到饱满状态时，传感器

将检测到的浇注混凝土压力进行数据转换输出，及时监测预警拱顶混凝土浇注情况，从而避免拱顶混凝土浇注脱空现象^[3]。

3 工程实例

某新建高速公路项目路线全长 52.59 km，共设主线桥 36 座，长 9 988.2 m，共设隧道 5 座，长 6 063 m，桥隧比 30.52%，互通立交 6 处，设计速度 100 km/h。其中，某隧道设计为分离式隧道，呈曲线展布，隧道总体轴线方向约 270°~274°；左线隧道起讫桩号 ZK16+405—ZK18+430，总长 2 025 m，隧道最大埋深约 196.9 m，位于 ZK17+440 处；右线隧道起讫桩号 K16+380—K18+450，总长为 2 070 m，隧道最大埋深约 198.6 m，位于 K17+440 处；采用人字坡，纵坡为 1.6%~-0.5%，隧址区地形起伏较大。

此隧道围岩主要为强风化—中风化粉砂岩，围岩层理、节理发育，级别均为 IV、V 级，其中左洞 IV 围岩 1 220 m，占比 60%，V 级围岩 805 m，占比 40%；右洞 IV 围岩 1 200 m，占比 58%，V 级围岩 870 m，占比 42%，强风化层岩体完整性较差。隧道围岩等级差，施工安全风险管控难度大。

4 隧道施工安全管理应用分析

4.1 支护设计

明洞段的支护设计需要综合分析洞口位置排水、地形地质环境、交通等因素。洞口位置明洞支护段主要采取钢筋混凝土整体衬砌结构，施工区域土方岩体整体呈现碎裂状、散体状。V 级围岩明洞段支护设计需要设置超前管棚；洞身支护则采取初期支护、衬砌支护复合型，初期支护主要采取格栅网架、锚杆、湿喷混凝土、钢架等，衬砌支护则采取混凝土结构^[4]。其中，不同钢架之间需要进行纵向钢筋的连接，钢架和径向锚杆之间也通过焊接的方式进行连接，初期支护需要确保整体化，能够有效地分担围岩荷载；软弱围岩路段开展二次衬砌时，由于施工荷载导致的围岩变形幅度较大，二次衬砌需要采取强度较大的钢筋混凝土结构，以确保施工安全。围岩强度较大的二次衬砌可以采取素混凝土结构，为了避免围岩渗水破坏，二次衬砌之前需要在初期支护上设置防水材料、透水排水管等。该隧道围岩支护经设计验算，满足强度及变形要求，支护参数如表 1 所示。

表1 支护参数

施工项目		对称明洞	V级浅埋	V级深埋	IV级深埋
锚杆	长度/m	—	3	3	3
	位置/m	—	拱墙	拱墙	拱墙
	间距/m	—	1×0.8	1×0.8	1×0.8
喷射混凝土	仰拱/cm	—	25	25	—
	拱墙/cm	—	25	25	25
钢筋网/mm	—	F8@200×200	F8@2 000×200	F8@2 500×200	
仰拱、拱墙	60 cm 钢筋混凝土	50 cm 钢筋混凝土	50 cm 钢筋混凝土	50 cm 素混凝土	
钢架间距/cm	—	60(118)	80	120(格栅)	
预留变形/mm	—	150	150	120	

4.2 台车基本要求

经标准化设计后的台车需要满足结构稳定性及强度、刚度等基本要求，且不同构件的尺寸、质量需要满足快速装配的需求。台车组装侧模时预留 5~7 cm 空隙并且堵塞木条，其边拱顶、边墙均为一次浇注成型。该台车整体构件多采取螺栓连接，其全断面尺寸可通过升降门架高度来实现（支座加高、枕木调平），门架之间通过 L 形剪刀撑连接，衬砌施工结束后可快速拆卸，能够周期性利用。台车模板外径设计需要增大 5~7 cm，以便适应隧道衬砌净空需求；台车行进线和隧道中心线相互吻合，误差控制在 50 mm 以内；模板能够自动进行收缩，以便满足隧道内部操作空间要求。衬砌区域作业窗口大小为 50 cm×50 cm，窗口位置附近需要强化加固，避免出现较大的变形，纵向作业窗口间距控制在 3 m 以内，横向作业窗口间距控制在 2.5 m 以内。衬砌台车关键技术参数^[9]如表 2 所示。

表2 衬砌台车技术参数

序号	项目	参数
1	衬砌长度/m	13
2	外轮廓尺寸加大值/cm	5~7
3	台车纵向坡度/%	4
4	输送管直径/cm	15
5	布料层数/层	7
6	模板面板厚度/mm	12
7	控制方式	集成监测
8	行进速度/(m·min ⁻¹)	6.6

4.3 施工安全管理

4.3.1 台车调试

台车调试是确保台车施工安全的关键工作，

台车应用之前进行门架系统、支撑系统、模板系统调试。门架系统的调试主要包括静荷载、动荷载试验，作为台车关键受力结构，其结构稳定性需要经计算分析，确保门架系统使用安全；台车支撑系统的调试主要是对液压油缸精度、稳定性进行仔细检查，避免台车结构出现位置偏移及倾覆等安全事故；模板系统的调试主要是分析模板对衬砌质量的影响，控制模板设计参数，弱化模板对混凝土浇注质量的影响，模板整体外观相关要求^[6]如表 3 所示。

表3 模板外观尺寸整体要求

序号	项目	参数
1	模板平整度/mm	≤0.5
2	轮廓半径误差/mm	±3
3	模板错台/mm	≤1
4	接缝间距/mm	≤1
5	粗糙程度	无锈蚀
6	前后段轮廓误差/mm	≤1
7	工作窗口、模板面之间尺寸误差/mm	≤1

4.3.2 二次衬砌施工

当隧道监测变形量超过总变形量 80%、拱脚变形速率小于 0.15 mm/d 时，开展该隧道二次衬砌施工。台车就位采取五点定位法，以便快速确定台车位置。衬砌混凝土浇注、养护中，台车需要及时将衬砌混凝土进行封闭处理，且需全方位湿养护，衬砌混凝土内外部温度差不得大于 5℃，周围温度变化速度控制在 10℃/h。衬砌注浆需要在混凝土浇注完成后按以下流程进行：安装固定注浆管、衬砌混凝土浇注、注浆、拆除、养护及无损检测^[7]。该隧道注浆孔布置如图 1 所示。其中 1 号孔可以作为排气孔及注浆孔，2、3、4 号孔则为注浆孔，1—4 号注浆孔距端部均为 1 m。

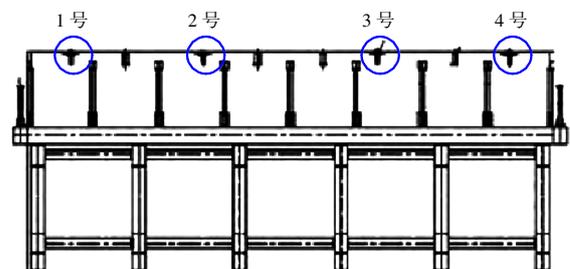


图1 注浆孔布置示意图

4.3.3 隧道台车安全措施

隧道台车上设置圆形通风管架，便于规矩放

置通风管，满足隧道施工的通风量要求，从而保证作业人员的职业健康安全。台车周边设置轮廓灯带，起到台车轮廓示宽和照明的作用，保障施工车辆运输安全和作业人员安全。台车上安装应急报警电话，保持洞内洞外联系通畅，一旦发生险情，可以作为对外应急联系方式，确保隧道人员作业安全可靠。

4.4 应用效果

该高速公路隧道首次衬砌施工，混凝土浇注总时长达 11 h，共浇注混凝土超过 250 m³。现场施工结果表明，经优化后的标准化衬砌台车运行稳定，变形程度小，施工过程中台车衬砌浇注流畅，模板定位效率高。拆模后，经过对混凝土质量进行检测分析、调查可知，混凝土成型后整体密实、均匀，不存在蜂窝、麻面等质量病害，外观状态相对完好；经 X 射线无损检测及钻芯取样分析，混凝土内部并无孔隙，尺寸和厚度等满足技术要求，质量优良。

5 结语

隧道标准化台车不仅能够保证隧道施工质量，而且极大降低了事故的发生，有效解决了衬砌钢

模台车可重复性差、施工成本过高、模板损耗率大等问题。准化衬砌钢模台车设计中，重点进行面板材料、旋转布料系统、L 形钢端模、拱顶防脱空监测等 4 个方面的优化，现场隧道施工应用结果表明，衬砌台车施工流畅，效率较高，衬砌混凝土质量无病害，外观整洁。本文分析总结有助于该标准化台车在后续类似隧道施工中的质量控制和安全应用。

参考文献：

- [1] 郭志,曲秋芬,樊治国,等.青岛地铁 1 号线双护盾 TBM 施工技术创新[J].隧道建设(中英文),2021,41(8):1385-1391.
- [2] 董万龙,白守兴,李延涛.小半径曲线暗挖隧道二次衬砌模板台车定位控制技术[J].建筑技术,2022,53(9):1123-1125.
- [3] 王恒珂,刘斌.海底隧道新型顶模模板台车结构设计及应用研究[J].起重运输机械,2021(5):55-59.
- [4] 梁邦炎,马亿光明,陈猛,等.智能台车移运大型钢筋混凝土沉管上驳工艺研究[J].中国港湾建设,2021,41(12):55-60.
- [5] 张龙,袁玮,张博,等.运营铁路隧道维护关键设备研制及施工工艺研究[J].现代隧道技术,2022,59(S1):1017-1022.
- [6] 任昌真,吕敬钱,牟联松.鹫峰山一号隧道衬砌环向施工缝破损防治技术[J].建筑技术,2023,54(16):2001-2005.
- [7] 牛孔肖,荆留杰,陈帅,等.智能锚注一体台车钻臂运动学研究[J].机械设计与制造,2023(11):273-277.