

DOI: 10.7672/sgjs2024230011

隧道简易高效蒸汽养护台车设计及应用*

闫腾飞^{1,2}, 刘 星^{1,2}, 包汉营^{1,2}, 张嘉轩², 李 厂²

(1. 中国建筑土木建设有限公司, 北京 100070; 2. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200122)

[摘要] 针对某隧道气候干燥和温差大导致二次衬砌养护不及时、不规范引发的干缩裂缝及强度提升慢的问题, 自主研发设计了简易高效蒸汽养护台车, 包含主体台车骨架、走行系统、保温保湿结构层、周边气囊封堵模块、电力系统及大功率蒸汽发生系统等, 并开展实地加工与应用。研究表明: 蒸汽养护台车结构可满足过程安装及应用背景下的结构安全验算。蒸汽养护台车简易、高效, 实地加工生产测试得知整体生产加工周期为 17d, 综合成本为 24 万元。二次衬砌 C35 混凝土 7d 养护下的强度较喷雾、自然养护方式分别提升 25.6%, 49.5%, 实现了快速提高强度的目的; 56d 养护下的强度较喷雾、自然养护方式分别提升 5.7%, 10.8%, 满足干燥环境下隧道的养护需求。

[关键词] 隧道; 蒸汽养护; 结构设计; 测试; 裂缝; 强度

[中图分类号] U455

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)23-0011-0005

Design and Application of Simple and Efficient Steam Curing Trolley for Tunnels

YAN Tengfei^{1,2}, LIU Xing^{1,2}, BAO Hanying^{1,2}, ZHANG Jiaxuan², LI Chang²

(1. China Construction Civil Engineering Co., Ltd., Beijing 100070, China;

2. China Construction Eighth Engineering Bureau Co., Ltd., Shanghai 200122, China)

Abstract: Aiming at the dry climate and large temperature difference of a tunnel, which leads to untimely and irregular secondary lining maintenance, drying and shrinkage cracks and slow strength enhancement, we independently researched, developed and designed a simple and high-efficiency steam curing cart, which includes the main cart skeleton, walking system, heat preservation and moisturizing structural layer, peripheral airbag blocking module, electric power system and high-power steam generating system, etc., and carried out the field processing and application. The study shows that the structure of the steam curing cart can meet the structural safety calculation in the context of process installation and application. Steam curing cart is simple, efficient, field processing and production tests learned that the overall production and processing cycle for 17d, the comprehensive cost of 240,000yuan. The strength of secondary lining C35 concrete under 7d curing is 25.6% and 49.5% higher than that of spraying and natural curing respectively, which realizes the purpose of rapid improvement of strength; the strength of 56d curing is 5.7% and 10.8% higher than that of spraying and natural curing respectively, which meets the needs of tunnel curing in dry environment.

Keywords: tunnels; steam curing; structural design; testing; cracks; strength

0 引言

隧道二次衬砌混凝土养护是隧道施工的重要环节, 但如果早期混凝土所处环境没有保持充分的湿度, 一方面会因干燥失水而影响水泥继续水化;

另一方面混凝土的干燥收缩加大, 使混凝土在低强度状态下承受收缩引起的拉应力, 导致混凝土出现早期裂缝^[1-3]。

目前隧道二次衬砌养护的主要形式包括: ①自然养护 隧道衬砌施工后不进行人工干预, 衬砌混凝土在自然条件下硬化; ②洒水养护 隧道衬砌施工后采用人工洒水的方式进行养护作业, 保证衬砌表面的湿度满足要求; ③雾炮养护 利用雾炮对衬

* 中建股份重大研发课题(CSCEC-2022-Z-2)

[作者简介] 闫腾飞, 硕士, 业务经理兼工区副总工程师, E-mail: ytf1436@126.com

[收稿日期] 2024-06-28

砌表面进行养护,相对人工洒水,机械化程度更高^[4-5];④喷淋式养护 利用台车设备对衬砌表面进行自动化喷淋作业,有效降低劳动强度,是目前较先进的养护方式^[6]。

目前隧道二次衬砌养护存在的问题为:①自然养护受环境温度湿度影响较大,容易产生裂纹等缺陷;②人工洒水难以保证洒水均匀,操作相对困难,随意性比较大,难以保证养护质量,洒水过多会造成水资源浪费,洒水过少又不能满足养护要求;③人工洒水对温度湿度的掌握不准确。隧道工程现场对衬砌混凝土温度湿度基本没有监测,喷水温度湿度难以准确控制,而混凝土表面与喷水温差较大,混凝土快速降温和降温不均匀会产生裂纹;④人工养护需要专人完成,一般需配置 1~2 名养护工人专门负责,劳动强度高,养护人工成本较高,养护效率低。

某隧道气候干燥、温差大,二次衬砌养护不及时、不规范易导致混凝土收缩变形,从而产生干缩裂缝,影响混凝土强度。混凝土材料结硬需要的温度和湿度主要靠热蒸汽提供,因此研发全封闭蒸汽养护台车尤为重要^[7-10]。

1 蒸汽养护台车结构功能设计

本文自主研发了隧道二次衬砌全封闭蒸汽养护台车,主要由主体台车骨架走行系统、保温保湿结构层、周边气囊封堵模块、电力系统及大功率蒸汽发生系统等部分组成(见图 1),主要原理是基于复杂结构制造具备保温隔湿性能的全封闭二次衬砌养护空间,并通过蒸汽发生系统动态提高、调整养护空间内的温度和湿度,从而实现二次衬砌的高效养护。同时根据蒸养台车设计及项目实际情况,形成快速安装方法。

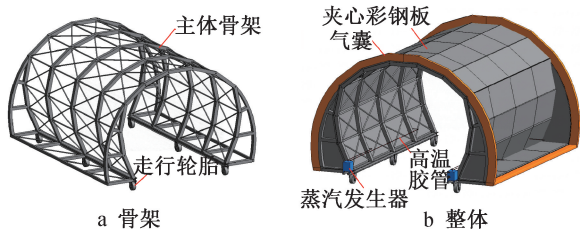


图 1 蒸汽养护台车结构

Fig. 1 Structure of steam curing trolley

1.1 主体台车骨架及走行系统

台车骨架如图 2 所示,由 I22 和 I18 组成,弧形悬挑段采用 I18 焊接,共计 5 榀型钢拱架,其中拱架顺洞方向每榀间距分别为 3,3.3,3.3,3m。每榀拱架纵向采用 $\phi 76$ 无缝钢管连接,同时焊接 $\phi 60$ 斜撑

增加结构稳定性。悬挑端主要起支撑气囊的作用,仅在最前端及最尾端存在。骨架受力主要集中于连接轮胎的主体冠梁上。连接轮胎的主体冠梁采用双拼 H200。骨架焊接橡胶型实体轮胎 6 个,每侧 3 个,轮胎及其上部连接板整体高 65cm,轮胎直径 55cm,焊接于主体冠梁前后端及中点位置。同时冠梁前端焊接挂钩,在结构系统走行时,两侧挂钩各悬挂 1 条钢丝或绳索,采用铲车推动钢丝或绳索实现结构走行。



图 2 台车骨架

Fig. 2 Car frame

1.2 高性能保温保湿结构

采用夹心彩钢板结合 PVC 防水篷布形成保温保湿层,采用 T 形钉将保温夹心彩钢板固定至骨架结构上层,后在夹心彩钢板上覆盖 1 层 PVC 防水篷布。通过测试结果得知,蒸养台车可满足温度提升达到 $10^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的要求。

1.3 周边气囊封堵模块

采用 3 层式矿用塑料涂覆布气囊,外层为阻燃抗静电高韧性膜结构,第 2 层为缓冲层,第 3 层为加厚橡胶内胆,有效抵抗隧道施工环境下尖锐物对气囊的挤压与冲击,耐久性好。

气囊分为弧形气囊与直线形气囊:弧形气囊用于封堵顺洞方向前端及后端,同时为了施工方便,弧形气囊分左弧段及右弧段;直线形气囊主要用于左侧及右侧端部封堵。气囊采用气泵充气,使用完毕后可泄气。

1.4 电力系统

电力系统主要供应蒸汽发生器,线路连接应设立电箱。

1.5 大功率蒸汽发生系统

通过悬挑工字钢搭建平台,完成蒸汽发生器的固定焊接。蒸汽发生器焊接于进洞方向尾部,左右各 1 台。

将大功率蒸汽发生系统集成于台车结构端部,并通过高温胶管将蒸汽传输至密闭养护空间内。蒸汽发生器外接温度湿度监测元件于密闭养护空间内,可根据设定温度湿度与实测温度湿度动态调

整自身工作性能,实现养护空间的温度湿度动态调整与平衡。

每台蒸汽发生器仅 1 个出气口。需要安装三通,2 根蒸汽高温胶管分别输至密闭空间内。进气口分别位于第 2 榀和第 4 榀骨架附近。分散输入的主要目的是将蒸汽均匀分布,实现密闭养护温度和湿度的快速提升。

2 蒸汽养护台车骨架结构验算

2.1 骨架结构使用阶段验算

基于 SAP2000 有限元软件建立计算模型,如图 3 所示。

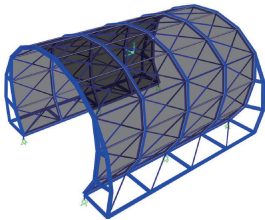


图 3 台车门式结构模型
Fig. 3 Trolley door structure model

本结构所受荷载主要是蒸汽封堵位置荷载,取 1.5kN/m^2 ,分布面荷载取 0.7kPa 。

根据荷载分布特点,选用的荷载组合主要有以下几种。

1) $0.9\times(1.3D+1.5L)$ 承载力计算 (D 为恒荷载, L 为活荷载)

由计算结果可知,在 $0.9\times(1.3D+1.5L)$ 荷载作用下,应力比最大为 $0.935<1$,满足规范要求,受力最大部位都在两端的拱圈,主要是由于这两侧承受较大的气囊压力。

2) $D+L$ 变形计算

经过数值模拟计算,水平方向的位移表现为结构拱脚、拱顶变形小 ($0.2\sim2.4\text{mm}$),结构拱腰位移大 ($4.8\sim6.4\text{mm}$),其中最大水平变形主要发生在从拱脚起往上第 3 根纵向系杆上,为 6.40mm 。纵向方向变形表现为结构顺洞前后端变形大 ($0.78\sim1.08\text{mm}$),其余位置变形小 ($0\sim0.13\text{mm}$),其中最大水平变形主要发生在弧形气囊悬挑端钢架与纵向气囊悬挑端钢架交接处,为 1.08mm 。垂直方向的变形主要表现为结构拱脚、拱顶变形小 ($0.70\sim4.40\text{mm}$),结构拱腰变形大 ($5.90\sim7.80\text{mm}$),其中最大水平变形主要发生在从拱脚起往上第 3 根纵向系杆上,为 7.80mm 。综合计算显示,最大变形为 10.1mm ,满足单层网壳结构变形限值要求。

2.2 骨架结构安装轮胎过程验算

根据实际情况,使用阶段,一端进行铰接约束,

节点位移上抬 600mm ,模拟轮胎安装情况,一端竖向约束,安装过程中只承受自身重力。

1) $0.9\times1.3D$ 应力比

由计算结果可知,在 $0.9\times1.3D$ 荷载作用下,应力比最大 $0.188<1$,满足规范要求,受力最大部位都在触地端拱圈。

2) $0.9\times1.3D$ 位移

抬升一端时,经过数值模拟计算,水平方向的位移表现为结构顺洞前端(未抬升一端)变形大 (3.04mm),其余位置变形小。纵向方向的变形表现为拱顶变形大,结构抬升一侧最大,为 3.36mm ,结构其余部分变形保持在 $0.24\sim3.36\text{mm}$ 。垂直方向的变形主要表现为抬升一侧变形大,为 $5.40\sim5.85\text{mm}$,并逐渐沿未抬升一侧递减至 0。综合计算显示,最大变形为 6.72mm 。由计算结果可知,在轮胎安装过程中,下部支点上抬 600mm 后,最大变形为 $6.72\text{mm}<8\,310.8/400=21\text{mm}$,满足单层网壳结构变形限值要求。

3 蒸养台车安装方法

1) 组装骨架 采用 2 台起重运输车配合作业将 5 榀主体骨架与主体冠梁连接,同时连接纵向连系杆与斜撑,如图 4 所示。

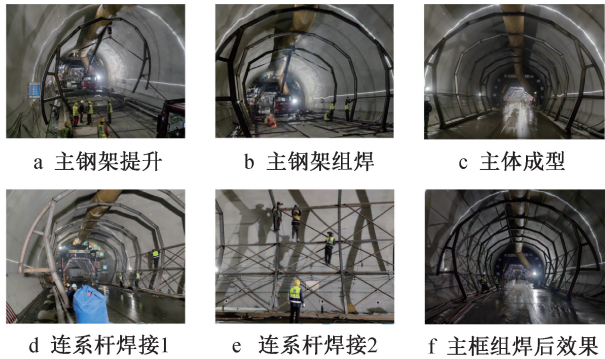


图 4 骨架组焊

Fig. 4 Skeleton assembly welding

2) 安装岩棉夹心彩钢板 采用 T 形钉固定保温板,并将 T 形钉焊接于工字钢上进行固定(见图 5,6)。

3) 焊接轮胎 用铲车将主体结构顶升,焊接 6 个定向轮。焊接时应先焊接冠梁一侧,后焊接冠梁另一侧。

4) 覆盖 PVC 篷布 利用高空作业平台将 PVC 篷布覆盖至保温板上方,并进行固定。

5) 安装气囊 首先采用气泵给气囊充气,直至气囊饱满。采用粗绑丝将直线形气囊固定于左右悬挑端纵向联系工字钢上;借助高空作业平台,采用粗绑丝将弧形气囊固定于前后端主体骨架上(见

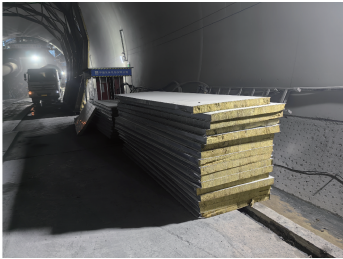


图 5 岩棉夹心彩钢板

Fig. 5 Rock wool sandwich color steel plate



图 6 T 形钉

Fig. 6 T-shaped nail

图 7)。



图 7 气囊安装

Fig. 7 Airbag installation

6)安装蒸汽发生器 在台车顺洞方向尾部左右两侧各自焊接 1 个悬挑平台,后将 2 台 24kW 蒸汽发生器焊接固定于悬挑平台上。同时将每台蒸汽发生器发出的蒸汽利用高温胶管引入密闭养护空间内(见图 8)。

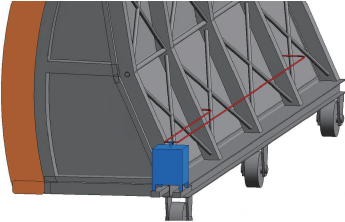


图 8 蒸汽管连接方式

Fig. 8 Steam pipe connection method

7)封闭前后悬挑端临空面 采用夹心彩钢保温板将前后悬挑端临空面封闭(见图 9)。同样采用 T 形钉固定保温板,并将 T 形钉焊接于工字钢上进行固定。

4 蒸汽步骤及要求

基于复杂结构制造具备保温隔湿性能的全封



图 9 封闭临空面

Fig. 9 Closed airface

闭二次衬砌养护空间,并通过蒸汽发生系统动态提高、调整养护空间内的温度湿度,从而实现二次衬砌的高效养护。

- 1) 蒸汽养护台车走行至新脱模二次衬砌位置处。
- 2) 采用气泵将气囊充气至充盈状态。
- 3) 启动蒸汽发生器,开始养护(见图 10)。



图 10 蒸汽情况

Fig. 10 Steam situation

蒸养台车采用 48kW 大功率蒸汽发生器调节养护温度和湿度,可在 3h 到达设定温度湿度,升温速率控制在 10℃/h,湿度保持 95% 以上,二次衬砌脱模后第一时间将蒸养台车运移至养护截面开始养护,养护时长 3d,耗水量 1 400kg/d。养护温度第 1 天保持在 45℃,第 2 天逐渐由 45℃ 动态下降至 35℃,第 3 天由 35℃ 下降至 30℃。蒸养结束后,二次衬砌将继续采用洒水方式完成后续养护。

5 效果检查

2023 年 7 月开展蒸养台车应用,针对以上对策措施的实施情况,继续开展隧道二次衬砌强度及裂缝控制合格率的检查,全面检查蒸养台车应用后的二次衬砌,8—11 月裂缝控制率已分别提升至 97%, 98%, 96%, 97%(见图 11)。

C35 二次衬砌混凝土 7d 养护下的强度(29.9MPa)较喷雾(23.8MPa)和自然养护(20.0MPa)分别提升 25.6%, 49.5%, 实现了快速提高强度的目的;56d 养护下的强度(39.1MPa)较喷雾(37.0MPa)和自然养护(35.3MPa)分别提升 5.7%, 10.8%(见图 12)。

6 结语

针对干燥环境下二次衬砌养护难度大、开裂概

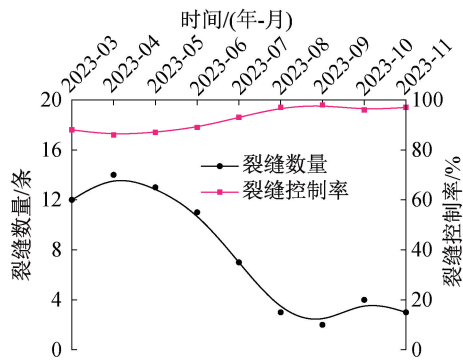


图 11 裂缝控制情况

Fig. 11 Crack control situation

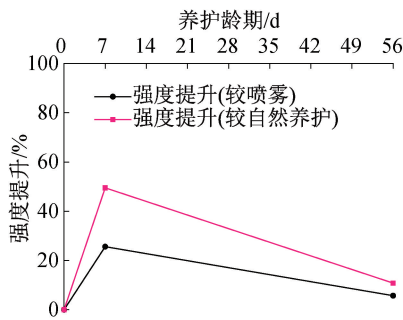


图 12 强度提升情况

Fig. 12 Strength enhancement status

率高的情况,以某山岭隧道项目为背景开展数值模拟研究,基于复杂结构制造具备保温隔湿性能的全封闭二次衬砌养护空间,并通过蒸汽发生系统动态提高、调整养护空间内的温度湿度,设计了蒸汽养护台车,主要得出以下结论。

1)自主研发了隧道二次衬砌全封闭蒸汽养护台车,由主体台车骨架及走行系统、保温保湿结构层、周边气囊封堵模块、电力系统、大功率蒸汽发生系统等组成。

2)经过数值分析,蒸养台车结构可满足过程安装及应用背景下的结构安全验算。

3)本蒸汽养护台车具备简易高效特点,并实地进行了加工生产测试,整体生产加工周期为 17d,综合成本 24 万元。

参考文献:

[1] 张帅,刘世林,薛江龙,等. 隧道穿越挤压性软岩支护参数优化研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(21): 48-54.
ZHANG S, LIU S L, XUE J L, et al. Research on optimization

of support parameters for tunnel crossing compressive soft rock [J]. Construction technology, 2023, 52(21): 48-54.

[2] 刘天浩. 山岭公路隧道二衬混凝土开裂原因分析及防治措施 [J]. 科学技术创新, 2020(21): 109-110.
LIU T H. Analysis and prevention measures for cracking of secondary lining concrete in mountain highway tunnels [J]. Scientific and technological innovation, 2020(21): 109-110.

[3] 安建刚. 隧道二次衬砌混凝土质量通病成因及防治措施研究 [J]. 交通建设与管理, 2022(5): 130-131.
AN J G. Research on the causes and prevention measures of common quality problems in secondary lining concrete of tunnels [J]. Transportation construction and management, 2022(5): 130-131.

[4] 彭伟. 自动喷雾养护台车应用研究[J]. 建筑机械化, 2021, 42(2): 68-72.
PENG W. Application research of automatic spray maintenance trolley[J]. Construction mechanization, 2021, 42(2): 68-72.

[5] 秦磊, 吴俊杰. 一种隧道用喷雾养护装置的研究应用[J]. 现代制造技术与装备, 2018(12): 46-47.
QIN L, WU J J. Research and application of a spray maintenance device for tunnels [J]. Modern manufacturing technology and equipment, 2018(12): 46-47.

[6] 周平, 仲牡, 周自强, 等. 隧道二次衬砌混凝土自动喷淋养护系统设计与应用[J]. 施工技术, 2019, 48(S1): 711-714.
ZHOU P, ZHONG S, ZHOU Z Q, et al. Design and application of tunnel second lining concrete automatic sprinkler maintenance system[J]. Construction technology, 2019, 48(S1): 711-714.

[7] 谭贤君, 陈卫忠, 王辉, 等. 寒区隧道二次衬砌混凝土冬季施工温控技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 150-160.
TAN X J, CHEN W Z, WANG H, et al. Research on temperature control technology for winter construction of tunnel concrete lining in cold regions [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2013, 32(1): 150-160.

[8] 武家欣, 王柏松, 王浩, 等. 隧道衬砌智能蒸汽养护台车的设计与研究[J]. 工程机械, 2020, 51(5): 13-17, 6.
WU J X, WANG B S, WANG H, et al. Design and research of intelligent steam maintenance trolley for tunneling [J]. Construction machinery and equipment, 2020, 51(5): 13-17, 6.

[9] 李太荣. 一种数字化养护台车研制及应用[J]. 铁道建筑技术, 2023(5): 46-48, 117.
LI T R. Development and application of a digital maintenance trolley[J]. Railway construction technology, 2023(5): 46-48, 117.

[10] 廖永发. 隧道衬砌混凝土蒸汽养护台车的设计研究[J]. 建筑机械化, 2023, 44(8): 73-75.
LIAO Y F. Design study of tunnel lining concrete steam curing trolley[J]. Construction mechanization, 2023, 44(8): 73-75.