

中东欧公路隧道反光涂层关键施工技术

王冬恒, 潘志鑫

(中交一公局集团有限公司, 北京 100024)

[摘要] 隧道反光涂层是隧道附属结构的一个重要组成部分, 隧道反光涂层的施工质量对隧道的运营质量有重要影响。中东欧地区在欧标体系下隧道反光涂层的施工工艺与国内差别较大, 以黑山南北高速公路隧道反光涂层施工为例, 从施工材料、表面处理、反光涂层施工、质量验收、易出现质量问题等方面进行阐述, 总结出一套适合中东欧高速公路施工理念的隧道反光涂层施工技术。研究结论表明, 基面湿度、环境温度、基面质量为关键条件因素, 加强检测和工序验收尤为重要。

[关键词] 高速公路; 隧道工程; 反光涂层; 施工技术; 中东欧

[中图分类号] U455.4

[文献标识码] A

[文章编号]

Key Construction Technology of Reflecting Coatings for Road Tunnels in Central and Eastern Europe

WANG Dongheng, PAN Zhixin

(China First Highway Engineering Co., Ltd., Beijing 100024, China)

Abstract: The tunnel reflecting coating is an important part of the tunnel auxiliary structure. The construction quality of the tunnel reflective coating has a very important influence on the operation quality of the tunnel. The construction process of reflecting coating for tunnels in Central and Eastern Europe under the European standard system is quite different from that in China. Taking the construction of reflecting coating for the tunnel of North-South Expressway in Montenegro as an example, the construction materials, surface treatment, reflecting coating construction, quality acceptance, ease of the quality problems that have arisen are expounded, and a set of tunnel reflecting coating construction technology suitable for the construction concept of Central and Eastern European expressways is summarized. The research conclusion shows that the base surface humidity, ambient temperature and base surface quality are the key conditions.

Keywords: expressway; tunnels; reflecting coating; construction; Central and Eastern Europe

0 引言

公路隧道反光涂层是公路隧道建设过程中的重要组成部分, 其施工质量直接影响行车安全。材料、施工工艺及现场施工环境条件的差异导致施工后的反光涂层易出现老化、开裂甚至脱落等现象, 耐久性 & 反光效果无法满足要求, 隧道运营维护成本增加, 安全性无法得到保障^[1-5]。本文以中东欧地区黑山南北高速公路为例, 通过对欧洲标准在设计、施工、验收等方面的研究, 结合现场施工实际情况, 期望能总结出一套适合中

东欧地区高速公路施工理念的隧道反光涂层施工技术, 为“一带一路”后续工程和国内外类似工程提供借鉴。

1 工程概况

黑山南北高速公路项目四标段位于黑山北部山区, 桥隧比例为 72%, 其中隧道 6 座, 单线长 7 029m, 洞口 24 个, 占线路总长的 39%。隧道反光涂层施工分为洞口段和洞内段 2 部分, 洞口段为 3 层喷涂, 长度为洞口 30m 范围内全断面喷涂; 洞内段为 2

[作者简介] 王冬恒, 高级工程师, 国家一级注册建造师, E-mail: wdh100@126.com

[收稿日期] 2023-10-11

层喷涂（Sikagard®-740 W、Sikagard® Wallcoat T），高度均为4m，如图1，2所示。

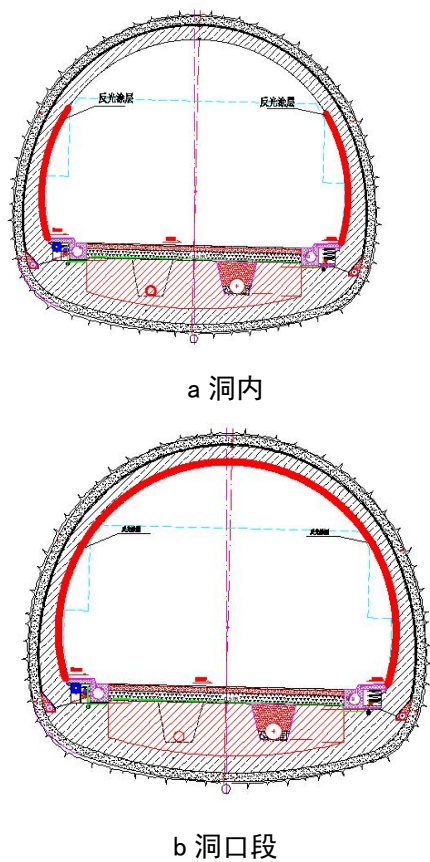


图1 隧道洞内与洞口反光涂层断面
Fig.1 Reflecting coating section in tunnel and portal

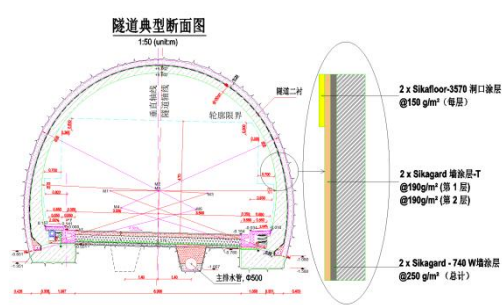


图2 隧道洞内反光涂层剖面
Fig.2 Profile of reflecting coating inside tunnel

2 隧道反光涂层施工

2.1 施工材料

喷涂施工所用材料需提前准备相关资

料报 MAR 至监理工程师获得批复方可使用。

1) 第 1 层（底层）喷涂材料为 Sikagard®-740 W，Sikagard®-740 W 材料不得稀释。

2) 第2施工材料为 Sikagard® Wallcoat T（分为 A 和 B 2 种组分）。Sikagard® Wallcoat T 均以 200L 桶装供应。因此，施工前适当对材料称重，确保施工用量和保证材料有效性。

3) 第3层施工采用材料为 SIKAFLOOR®-3570，洞口30m范围内进行第3层施工。施工分2次完成，每次150g/m²。材料规格和适用条件如表1，2所示。

表1 材料规格

Table 1 Material specifications		
名称	型号	包装方式
Sikagard®-740 W	疏水性，40% 硅甲烷	1 000L 容器
Sikagard® Wallcoat T	环氧树脂	270kg圆桶A材料，200kg圆桶B材料
Sikafloor®-3570	PU 溶剂防紫外 线	每组10kg，7kgA材料 和3kgB材料

表2 材料适用条件

Table 2 Material applicable conditions				
材料名称	适用 温度 /℃	喷涂 面湿 度/%	环境 温度/℃	环境相 对湿度
Sikagard®-740 W	5~35	<6	5~35	80%HR
Sikagard® Wallcoat T	10~ 35	<6	10~40	75%HR
Sikafloor®-3570	10~ 35	<4	10~35	80%HR

2.2 施工工艺

2.2.1 测量标记轮廓线

使用全站仪根据设计要求进行反光涂层高度范围放样标记，每隔 1m 进行标记。发现喷涂范围有铁钉或挂线钩要及时进行处理。第 1 次测量完成后，进行 10m 间隔复测，确认无误后进行下一步施工。

2.2.2 隧道表面处理

二衬表面清理后对有混凝土缺陷的表面进行修补，针对缺陷范围较大的混凝土将

使用手动压缩空气或电动破碎锤进行破碎。除去所有松散物料，即混凝土必须坚固健全，无裂纹或分层，并用高压水清洗混凝土表面。在水几乎干燥前，在处理区域涂刷 1 层 Sika MonoTop® 910N，以提高新混凝土对旧混凝土的附着力。在 Sika MonoTop 910N 层几乎干燥前，使用结构修复砂浆 Sikatop-122® SP 进行修补，最大厚度为 10~20mm，逐层修复（最后 1 层的表面应保持足够粗糙度），直到修复材料达到所需表面水平。用木制或塑料材质的抹刀完成表面。不要过度加工成品表面，因为这会产生富含水泥的表面纹理，可能导致表面形成随机开裂。针对缺陷较小、较稀疏的气孔缺陷，混凝土表面清洗干燥后直接使用结构修复砂浆 Sikatop-122® SP 进行逐个气孔修补，要求同上。

喷涂施工前表面采用高压水枪进行混凝土表面清洗处理，高压水枪压力要在 180~300bars（1bar=0.1MPa）。将混凝土表面的尘土、松动小块、油污、浮浆和风化物清理干净。清理时可分为 2 部分，4m 高度分为 2 层进行，以免有混合现象导致二衬污染，从隧道的高点向低点纵向顺序施工。

2.2.3 喷涂前准备工作

在喷涂前首先检测环境温度（>10℃）及隧道混凝土湿度（<6%），确保表面湿度符合要求，防止后期涂层起皮、起泡现象。由于喷涂材料含硅烷的产品作为沥青的溶剂，隧道内的沥青路面应防止被污染，施工时采用塑料防雨布遮盖。同样，任何由玻璃制成的部分或结构也应加以保护。隧道内已安装的机电设备及沟槽电缆需采取覆盖或包裹措施进行保护。

为避免外部因素对喷涂施工的影响和安全管理需要，施工时要对隧道进行洞口交通封闭管理。封闭洞口可避免洞内施工平台车与通行车辆产生交通安全问题，可避免车辆通行造成灰尘等影响喷涂质量。施工时作业人员需佩戴呼吸面罩及防护服进行防护。拱顶采用旋转伸缩作业平台辅助施工，拱顶喷涂时作业人员要佩戴安全带等措施。

由于喷涂时需用高压水枪清洗二衬表面，喷涂前需保证隧道已施工沥青路面至少 1 层。由于喷涂时隧道已贯通，为减少喷涂

时材料对人体的伤害，正常情况下采取隧道自然通风即可，必要时增设风扇或射流风机。

2.2.4 第 1 层喷涂施工

底层（第 1 层）喷涂材料为 Sikagard®-740 W，材料不得稀释，使用真空喷剂设备或低压喷枪。对于本项目大规模应用，采用无空气喷雾或低压喷枪，用于大面积且均匀喷涂。

典型设备参数要求为：喷头压力 50~80bars，喷嘴尺寸 0.18~0.28mm，过滤器为 200 目，喷雾角度 50°~80°。

后续的第 2 层喷涂要等待本层完全干燥后方可施工，一般等待时间为 5h 以上，具体时间视天气情况而定。如其他原因导致无法连续施工，必须将表面的尘土清理干净后方可进行后续施工，否则影响喷涂黏结性。

2.2.5 第 2 层喷涂施工

第 2 层喷涂施工材料为 Sikagard® Wallcoat T（分为 A 和 B 2 种组分）。

现场施工需准备精度 10g 的秤，另外准备 1 个清洁搅拌容器以备使用。本产品具有很强的氧化性能，故在打开包装后要在厂家规定时间内施工完毕，在大容器中，未混合的物质可能有轻微沉淀。在称量前，应进行机械混合。按下列混合比例分别称量各组分：73%比例的 A 成分材料和 27%的 B 成分材料，必须通过电子秤进行称重量取。将 B 组材料倒入 A 组材料，以低速（300~400 r/min）机械搅拌 3min。一旦混合完成，立即将混合材料转到 1 个干净容器，轻轻搅拌，排出混合材料的空气。

混合材料采用真空喷涂机施工，设备的具体参数为：喷头压力约 300bars，喷嘴尺寸为 0.53mm，无需过滤器，喷雾角度 50°~70°，传输软管直径 6mm。

本层施工同样采用 2 次施工方式，每次控制量为 190g/m²。施工过程中通过电子秤控制产品的用量和速率。具体注意事项同第 1 层施工。在喷涂过程中，喷涂范围内有小的蜂窝、麻面部位和预留预埋的矩形预留槽，要进行第 2 次补喷，确保厚度和槽内全面积覆盖。施工完毕后可逐渐拆除包边材料，但保留洞口 30m 范围进行第 3 层施工。

2.2.6 第3层喷涂施工

第3层施工采用材料为SIKAFLOOR®-3570，洞口30 m范围内进行第3层施工。施工为2次完成，每次150g/m²。Sikafloor -3570 是桶装产品。混合前为分开放置的A，B部分，机械地搅拌A部分。将B组分倒入A组分，以低速(300～400r/min)机械搅拌3min。一旦混合完成，混合材料转到一个干净容器中，轻轻搅拌，让空气排出。喷涂施工方法与第2层相同。

2.2.7 质量验收

混凝土基面必须完好、清洁、干燥、无污垢、无油污、涂层和表面处理完成。每次施工前对隧道已完成部分进行检测和检查，具体如表3所示。

表3 混凝土基面验收

Table 3 Acceptance of concrete base surface

检查项目	内容根据	频率	性能参数
表面清理	EN1542	每次开始前	符合材料性能要求
表面粗糙度	EN1542	每次开始前	
温度	EN1542	每次	
湿度	EN1542	每次	
喷涂强度	EN1542	每次开始前	>1.0N/mm ²

根据要求施工质量需符合波黑施工手册《Guidelines for Road Design, Construction , Maintenance and Supervision Volume II : Construction Section 3: Special Technical Conditions for Tunnels》—Banja Luka 2005及欧洲标准EN1542等相关要求^[6-7]。

喷涂施工应满足相关试验检测要求，如表4所示。

表4 喷涂质量验收项目

Table 4 Spraying quality acceptance project

检查项目	内容根据	频率	性能参数
干膜厚度	ISO 2808	每1000 m²	Sikagard® Wallcoat T:>135

			μm (总共); Sikafloor®-3570 >125 μm (总共)
断面检测	ISO2409-6	每1000 m²	取样留存备检
拉脱试验	EN1542	每5000 m²	>1.0N/mm²

喷涂施工完成后验收检查要求表面平顺、无起皮、无气泡，干膜厚度符合要求，喷涂表面颜色统一、整洁。拉脱试验结果满足设计要求。

3 施工中不良情况及处理措施

3.1 喷涂结束后出现起皮、鼓包现象

喷涂前需对隧道衬砌进行修补、冲洗、干燥，确保喷涂材料黏结性，如清理不干净、修补不牢固会造成起皮、鼓包现象。

发现起皮、鼓包现象时，应对相应喷涂位置进行铲除清理，待清理完成重新按程序进行喷涂^[8]。

3.2 拉脱试验不合格

出现拉脱试验不合格，拉力无法满足要求的原因有几种。

1)第1种是喷涂时温度不满足要求，喷涂材料无法达到相应强度，这种情况冬季尤为明显，要求喷涂施工前及时进行温度测试（环境温度>10℃），如无法满足要求可选择进行封闭加温的方法或待天气条件允许时施工。

2)第2种情况是隧道内环境湿度或混凝土湿度过大不满足要求，水汽造成喷涂材料与混凝土间黏结力不足，无法达到相应拉力。

3)第3种情况即混凝土表面清理不彻底出现与脱皮、鼓包相似情况。

针对拉脱试验不合格情况，需对相应范围内的喷涂材料进行铲除清理，待环境满足要求后重新喷涂^[9]。

4 结语

根据现场喷涂施工试验，在施工过程中基面清理修补、环境温度与湿度对喷涂质量影响尤为重要，施工过程中加强检测，不满足要求坚决不进入下一道工序，提前控制可

有效提高喷涂施工质量,避免返工施工造成不必要的工期和费用损失。

参考文献:

- [1] 王光勇. 衬砌保护层缺陷对隧道耐久性的影响及处置技术[J]. 国防交通工程与技术, 2013, 11(6):39-42.

WANG G Y. The impact of lining protection layer defects and disposal techniques on tunnel durability[J]. Traffic engineering and technology for national defence, 2013, 11(6):39-42.

- [2] 吴嵩. 浅谈轮廓反光设施在高速公路隧道工程中应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, 13(11):47-48.

WU S. Discuss the application of contour reflective facilities in highway tunnel engineering[J]. Highway transportation technology (Applied technology edition), 2017, 13(11):47-48.

- [3] 蔡贤云, 翁季, 张青文, 杜峰. 隧道照明墙面反射材料研究综述[J]. 灯与照明, 2017, 41(03):22-26.

CAI X Y, WENG J, ZHANG Q W, DU F. A overview of research on tunnel lighting wall reflective materials[J]. Lamps & Lighting, 2017, 41(03):22-26.

- [4] 何世永, 梁波, 罗红. 不同隧道侧壁涂料对汽车司机视觉反应的研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(01):48-54.

HE S Y, LIANG B, LUO H. Study on the visual reaction of different tunnel side wall coatings on car drivers[J]. Modern tunnelling technology, 2017, 54(01):48-54.

- [5] 梁波, 基于视觉功效法的反光材料辅助隧道节能照明的试验研究. 重庆市, 重庆交通大学, 2016-01-12.

LIANG B, Experimental study on reflective material-assisted tunnel energy-saving lighting based on visual efficacy method. Chong qing city, Chongqing Jiaotong University, 2016-01-12.

- [6] Bosnia and Herzegovina tunnel

construction manual :guidelines for road design, construction, maintenance and supervision[S]. 2005.

- [7] Special technical conditions for tunnel construction of Bar-Boljare Highway of Montenegro:technical conditions for performing tunnel works[S]. 2015.

- [8] Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Part 10: Site application of products and systems and quality control of the works:EN 1504-10[S]. 2017.

- [9] Products and systems for the protection and repair of concrete structures - test methods - measurement of bond strength by pull-out method:EN 1542[S]. 1999.