

# Research on maintenance technology and quality control of ultra-thin coating for high speed tunnel

Guixuan Dai

Yunnan Yunling Expressway Engineering Consulting Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650217, China

## Abstract

This study is based on the 2025 Qujing Management Office Jiangzhao Expressway Tunnel Cluster Maintenance Project. To address issues such as reduced anti-skid performance and cracking in expressway tunnel asphalt pavements, we explored ultra-thin overlay maintenance techniques and quality control methods. Through analysis of pavement conditions at eight tunnels totaling 5974.7m on the Jiangzhao Expressway, we determined optimal ultra-thin overlay materials and construction parameters, and established comprehensive quality control measures. Experimental results demonstrate that a 2.5cm thick UTO10 porous ultra-thin overlay with flame retardant additives, combined with precision milling techniques, can effectively enhance pavement safety and durability. This approach elevates the pavement's Standardized Resistance Index (SRI) to 85+ while maintaining a Pavement Condition Index (PCI) of 98+, extending pavement lifespan by 5-8 years. The findings aim to provide technical support for expressway tunnel pavement maintenance.

## Keywords

high-speed tunnel; ultra-thin coating; maintenance process; quality control

# 高速隧道超薄罩面养护工艺与质量控制研究

代贵选

云南云岭高速公路工程咨询有限公司，中国·云南 昆明 650217

## 摘要

本研究以2025年曲靖管理处，江召高速隧道群养护工程为依托。针对高速隧道沥青路面抗滑性能下降、裂缝等病害，探索超薄罩面养护工艺，及质量控制方法。通过对江召高速，8个总长5974.7m隧道路面状况进行分析，确定超薄罩面材料和施工参数，制定全流程质量控制措施。实验证明，2.5cm厚、添加阻燃剂的UTO10空隙型超薄罩面配合精铣刨等工艺，可有效提升路面安全性与耐久性，将路面SRI提至85+、PCI维持98+，延长路面寿命5-8年，以期为高速隧道路面养护提供技术保障。

## 关键词

高速隧道；超薄罩面；养护工艺；质量控制

## 1 引言

高速隧道因车辆尾气、光照、高湿度等特殊环境易使抗滑性能降低、产生裂缝等病害，影响行车安全。以江召高速公路隧道群为例，2024年检测部分隧道路面 SRI 最低值 67.69，存在较大安全隐患。超薄罩面养护以 2—3cm 超薄、施工速度快、对隧道净空影响小等特点，成为高速公路预防性养护的主要选择。本文以江召高速隧道群养护工程为例，从超薄罩面养护工艺、超薄罩面养护质量控制措施两方面进行研究，以期改善隧道路面状况，提升使用性能。

## 2 江召高速隧道路面技术状况分析

### 2.1 工程概况

江召高速公路隧道群共 8 个隧道，总长 5974.7m，均为双向四车道，设计速度 80km/h。隧道路面结构自上而下为 4cmSBS 改性 SMA-13 细粒式沥青混凝土、中分 6cmAC-20C 中粒式沥青混凝土（抗车辙剂）、下部 8cmAC-25C 粗粒式沥青混凝土。2024 年 11 月人工病害调查与检测隧道路面，主要病害为抗滑性能衰减、局部裂缝，典型病害路段如表 1 所示：

### 2.2 病害成因分析

抗滑性能衰减：隧道内车辆长时间制动，轮胎在路面表面磨损严重，局部出现骨料外露；隧道内湿度大，路面易形成水膜，轮胎与路面摩擦力减小<sup>[1]</sup>。隧道 2K1655+000~K1656+000 段，雨天水膜厚度可达 2mm，SRI 值降低到 67.69，易导致车辆打滑。

【作者简介】代贵选（1990-），男，中国云南宣威人，本科，工程师，从事高速公路工程施工与养护研究。

表 1 江召高速公路技术状况评定结果一览表（节选）

隧道名称	桩号范围	主要病害	SRI 均值	PCI 均值
隧道 1	K1650+000~K1651+000	抗滑性能衰减	80.53	98.75
隧道 2	K1655+000~K1656+000	抗滑性能衰减、局部裂缝（缝宽≤3mm）	67.69	97.77
隧道 3	K1660+000~K1661+000	抗滑性能衰减	71.66	98.59

裂缝产生：隧道进出口温差大（15℃），路面热胀冷缩，产生温度应力，导致局部裂缝；车辆荷载反复作用，路面结构层疲劳损伤，形成反射裂缝。隧道 3K1660+000~K1661+000 存在多处横向裂缝，宽度≤3mm。

材料老化：隧道内车辆尾气中的 NO<sub>x</sub>、CO 等有害物质加速了沥青的老化，使沥青变硬、变脆，路面抗裂性能下降，局部剥落<sup>[2]</sup>。隧道 1K1650+000~K1651+000 存在路面边缘 2m<sup>2</sup> 剥落。

3 高速隧道超薄罩面材料选型

3.1 沥青胶结料

采用 SBS 改性沥青，技术指标如下表所示，其针入度（25℃，100g，5s）为 50-80（0.1mm），软化点≥75℃，5℃延度≥30cm，135℃运动黏度为 1.0-3.0Pa·s。保障材料有良好的高低温性能和粘结性能，适应隧道内温差变化。

表 2：粘层用改性乳化沥青技术要求

试验项目	技术要求	试验方法
针入度（25℃，100g，5s）（0.1mm）	50-80	T0604
延度（5℃，5cm/min）（cm）	≥30	T0605
软化点（℃）	≥75	T0606
135℃运动黏度（Pa·s）	1.0-3.0	T0625、T0619
闪点（℃）	≥230	T0611

3.2 集料

粗集料：采用玄武岩，质地较坚硬，表面较粗糙，压

碎值< 20%，洛杉矶磨耗损失< 25%，磨光值> 42BPN，确保超薄罩面具有较好的抗滑性能和耐磨性。江召高速隧道超薄罩面施工中，粗集料粒径主要控制在 4.75mm 到 9.5mm 之间，占 60% 到 70%。

细集料：采用石灰岩机制砂，砂当量值大于或等于 65%，亚甲蓝值不大于 2.5g/kg，确保细集料干净，无杂质，可与沥青粘结。

填料：采用石灰岩矿粉，表观密度≥2.5t/m<sup>3</sup>，含水量≤1%，粒度符合规范要求，增强沥青混合料稳定性。

3.3 超薄罩面混合料

采用 UTO-10 空隙型级配，矿料级配如下表所示，空隙率为 10% ~ 18%，确保混合料具有良好的排水性，避免隧道内形成水膜；并添加阻燃剂（氢氧化铝），添加量为沥青质量的 3%，使超薄罩面氧指数≥28%，满足隧道防火要求。

4 高速隧道超薄罩面养护工艺

4.1 施工准备

原路面病害处治：对隧道内裂缝、剥落等病害进行预处理（如图 1 所示）。缝宽≤3mm 的裂缝采用加热型密封胶灌缝，缝宽> 3mm 的裂缝采用开槽扩缝（15mm×20mm）后灌缝；剥落处采用铣刨至原沥青中面层底（处治宽度≥2.5m），铺设玻纤格栅，喷洒 PCR 改性乳化沥青，回填 6cm 厚 SBS 改性 AC-20C（抗车辙剂）+4cm 厚 SBS 改性 AC-13C 沥青混凝土。隧道 2K1655+000~K1656+000 段，共灌缝 500m，剥落处治 25m<sup>2</sup>。

表 3 微表处混合料的矿料级配范围

级配类型	通过下列筛孔（mm）的质量百分率（%）									
	13.2	9.5	7.2	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
MS-3	100	100	83~96	70~90	45~70	28~50	19~34	12~25	7~18	6~12
波动范围	—	—	±4	±4	±4	±4	±4	±3	±3	±2

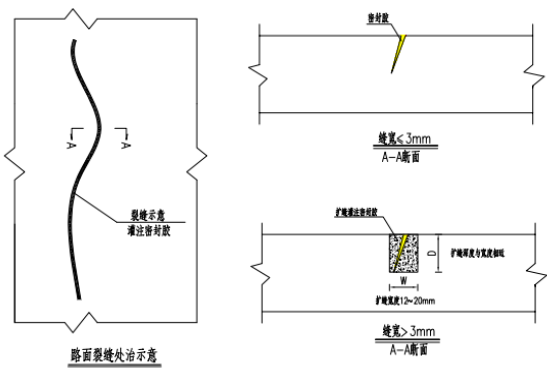


图 1：超薄罩面铺筑前路面纵（横）向裂缝处治

净空测量：测量隧道净空高度，确保超薄罩面施工后净空满足规范要求（≥5.0m）。净空不足的隧道，如 K1653+000 隧道净空 5.05m，铣刨厚度和新铺厚度一致，均为 2.5cm，不降低净空；净空充足的隧道，如 K1650+000 隧道净空 5.2m，铣刨 1.0cm 厚原路面。

材料准备：提前检测 SBS 改性沥青、集料、阻燃剂等原材料质量，保障满足设计要求；UTO-10 混合料采用间歇式拌和机拌和，拌和时间延长 5-10s，拌和温度控制在 170-185℃，储存时间不超过 6h。

4.2 精铣刨施工

铣刨参数确定：用精铣刨机对原路面进行铣刨，

铣刨深度根据净空来定,净空够路段铣刨1.0cm,净空不够路段铣刨2.5cm;铣刨刀间距 $\leq 8\text{mm}$ ,2m铣刨鼓装1004把刀具,铣刨界面平整,构造深度0.5-0.8mm。K1651+000~K1652+000段铣刨后界面平整度误差 $\leq 3\text{mm}$ 。

铣刨界面清理:铣刨结束之后,用吸尘车清除界面杂物,再用高压空气机吹净浮灰,使得界面干净、干燥、无污染;铣刨过程中产生的废料集中收集,运往指定地点处置,防止污染隧道环境<sup>[3]</sup>。

#### 4.3 同步洒布摊铺

黏层油洒布:用智能型沥青洒布车喷洒SBS改性乳化沥青黏层油,用量0.6~1.0L/m<sup>2</sup>,洒布温度80~90℃,黏层油均匀,无漏洒、堆积情况。K1654+000到K1655+000段,洒布之后等待乳化沥青破乳(30min左右),再做超薄罩面摊铺。

超薄罩面摊铺:采用专用同步洒布摊铺设备,一次性完成黏层油喷洒、超薄罩面摊铺,时间间隔不大于5s;摊铺温度控制在160℃-170℃之间,摊铺速度2m-3m/min,熨平板预热100℃以上,采用中强夯,初始压实度不小于85%。K1656+000-K1657+000段,摊铺过程中螺旋布料器匀速,防止离析。

#### 4.4 碾压施工

碾压设备选型:采用11-13吨双钢轮压路机,禁止使用轮胎压路机,避免出现推移;分初压、复压、终压3步,初压温度 $\geq 150^\circ\text{C}$ ,复压温度 $\geq 140^\circ\text{C}$ ,终压温度 $\geq 90^\circ\text{C}$ 。

碾压工艺参数:初压静压2遍,碾压速度2~3km/h;复压振动碾压3遍,振动碾频率30~50Hz,振幅0.3~0.5mm,碾压速度3~4km/h;终压静压2遍,碾压速度3~6km/h。K1657+000~K1658+000段碾压后超薄罩面压实度 $\geq 96\%$ (试验室标准密度),平整度 $\sigma \leq 1.5\text{mm}$ 。

#### 4.5 养护与开放交通

初期养护:超薄罩面摊铺碾压完成后,严禁车辆、行人通行,养护时间 $\geq 4\text{h}$ ,确保罩面充分成型;养护期间,开启通风设备降低隧道内湿度,防止罩面早期水损坏,K1658+000~K1659+000段养护期间隧道内湿度控制在60%以下。

开放交通:罩面表面温度低于50℃时开放交通,初期限速60km/h,24小时后恢复正常限速。开放交通后定期清扫路面,避免杂物堆积影响罩面。K1659+000-K1660+000段,开放交通1周内,日均清扫2次。

### 5 高速隧道超薄罩面质量控制措施

#### 5.1 原材料质量控制

进场检验:原材料进场时,查验出厂合格证、检测报告,对SBS改性沥青、集料、阻燃剂等抽样检测,SBS改性沥青每批检测针入度、软化点、延度等指标,集料每批检测压碎值、磨光值、级配等指标,不合格材料不得进场。如江召高速隧道养护中,共检测沥青批次12次,集料批次8次,

合格率100%。

存储管理:SBS改性沥青储存在带搅拌的储罐中,使用前搅拌均匀;集料分仓堆放,隔墙分隔,避免混料;阻燃剂密封防潮防晒。K1660+000附近料场,集料堆放仓容积 $\geq 500\text{m}^3$ ,隔墙2m,确保存储质量。

#### 5.2 施工过程质量控制

铣刨质量控制:每500m检测铣刨深度、界面平整度、构造深度,铣刨深度允许偏差 $\pm 0.1\text{cm}$ ,平整度误差3mm,构造深度0.5-0.8mm。K1661+000~K1662+000段共检测10个断面,合格率98%。

摊铺质量控制:每隔100m测一次摊铺厚度、温度,摊铺厚度允许偏差为-10%,温度控制在160℃-170℃,采用随机抽样法检测混合料级配、油石比,级配允许偏差为 $\pm 2\%$ ,油石比允许偏差为 $\pm 0.3\%$ 。K1662+000-K1663+000段共随机抽样检测混合料20组,合格率95%。

碾压质量控制:每200m测压实度、平整度,压实度 $\geq 96\%$ , $\sigma \leq 1.5\text{mm}$ ;钻芯法检测压实度,每1km芯3个。K1663+000~K1664+000段芯检压实度均值97.2%,满足设计要求。

#### 5.3 交工验收质量控制

外观质量验收:检查超薄罩面表面平整、均匀,没有离析、划痕、泛油等现象;接缝处紧密,平顺,高差 $\leq 3\text{mm}$ 。K1664+000~K1665+000,外观质量合格,没有明显问题。

性能指标检测:检测路面SRI、PCI、RQI(路面行驶质量指数)等指标, $\text{SRI} \geq 85$ , $\text{PCI} \geq 98$ , $\text{RQI} \geq 94$ 。如江召高速隧道群养护后8个隧道路面SRI均值88.6,PCI均值98.5,RQI均值94.8,均满足规范要求;检测超薄罩面厚度、抗滑性能、渗水系数,厚度均值2.5cm,构造深度 $\geq 0.6\text{mm}$ ,渗水系数 $\leq 10\text{mL/min}$ 。

### 6 结论

本文依托江召高速隧道群养护工程,探究隧道路面抗滑衰减及裂缝等病害,并对超薄罩面养护工艺及质量控制方法展开研究。实践证实,2.5cm加3%阻燃剂的UTO-10空隙型超薄罩面,精铣刨(刀间距 $\leq 8\text{mm}$ )、同步洒布摊铺(160℃左右)、分阶段碾压(压实度 $\geq 96\%$ )工艺,可有效治理病害,养护8个隧道SRI均值88.6、PCI均值98.5,使用寿命可延长5年左右,施工对隧道净空影响较小,质量控制措施可为类似工程预防性养护提供参考。

#### 参考文献

- [1] 赵振兴.改性超薄罩面在隧道路面抗滑处治中的应用[J].运输经理世界,2020,(16):105-106.
- [2] 杨耀森.常温超薄罩面在隧道路面养护中的应用[J].运输经理世界,2023,(06):133-135.
- [3] 宁瑞林,崔亚萍,李劲,等.低噪音超薄罩面在长大隧道工程中的应用分析[J].中国公路,2022,(08):104-106.