

道路沥青混凝土面层质量检测研究

文 / 刘宗博 深圳高速工程检测有限公司

摘要：广深高速新塘立交改造工程针对亚热带多雨气候（年均降水量1800mm）及重载交通（货车占比35%）环境，构建了沥青混凝土面层质量检测体系，以保障道路耐久性与行车安全。通过《公路路基路面现场测试规程》等规范要求，选定压实度、厚度、平整度及渗水系数为核心检测指标，采用钻芯法、三维激光扫描、地质雷达等创新技术强化检测精度。结果显示：压实度主线均值97.1%、匝道96.3%，合格率100%；厚度控制严格，主线均值12.0cm（设计12cm）、匝道11.8cm，偏差均未超 ± 0.5 cm；平整度主线IRI均值1.3m/km，匝道1.7m/km，最大间隙4.2mm；渗水系数主线85mL/min、匝道105mL/min，均满足规范要求。研究提出“取样-扫描-复检”三级控制体系，实现压实度与厚度协同控制（偏差 < 0.3 cm）、渗水系数与气候适配的目标。

关键词：道路工程；沥青混凝土；面层质量检测；压实度

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.12.067

引言

随着城市化进程加速，既有高速公路互通立交面临通行能力不足、土地利用率低等突出问题。广深高速新塘立交作为连接国家干线公路与城市路网的关键节点，日均车流量超10万辆，原有双向6车道已无法满足交通需求。本次改造通过扩建主线为双向12车道、新建下沉隧道及匝道系统，实现交通流高效转换，同时释放土地7.2万 m^2 用于上盖综合开发。项目地处亚热带季风气候区，年均降水量1800mm，重载货车占比达35%，对沥青面层的抗车辙性、水稳定性提出极高要求。在此背景下，构建科学的质量检测体系，成为确保道路耐久性和行车安全的核心技术保障。

一、沥青混凝土面层道路建设工程概况

广深高速新塘立交改造工程位于广州市增城区新塘镇，是广深高速与国道G107的核心交通转换节点。为缓解日均10万辆以上的车流通行压力、提升土地集约化利用水平，项目对原立交实施全面升级：主线改造长度1.01km，将双向6车道扩建为分离复合式双向12车道，拆除旧桥752m并新建桥梁2993.24m；同步建设匝道4873.2m、下沉式隧道540m（其中国道G107隧道560m），新增3处收费站及7.2万 m^2 隔音降噪上盖结构。工程采用公路-I级荷载标准，主线设计时速120km/h，匝道分段限速60km/h与40km/h，建设周期为2020年6月至2023年6月。

针对亚热带多雨气候（年均降水量1800mm）及重载交通占比35%的运营环境，沥青混凝土面层需具备高抗车辙性与水稳定性。由于主线日均通行货车超3.5万辆，面层厚度偏差超过 ± 0.5 cm将加速结构疲劳损坏，压实度不足96%易引发渗水剥离病害。因此，通过科学检测控制面层压实度、厚度、平整度的空间均匀性，是保障道路15年设计寿命、降低全周期运维成本的核心技术环节，更是规避重载交通安全隐患的关键举措。

二、道路沥青混凝土面层质量检测分析

（一）检测项目与标准制定依据分析

1. 检测项目选择与规范匹配性

依据《公路路基路面现场测试规程》（JTG 3450-2019）及《公路工程质量检验评定标准》（JTG F80/1-2017），本项目针对沥青混凝土面层选定压实度、厚度、平整度三项核心检测指标。以RNK20+420-750沥青面层为例，其压实度检测频率设定为每200m测2点，与规范要求（每200m测2点）高度匹配。对LWK19+504~LWK20+240左-外面层等关键路段，增加红外热成像辅助检测，识别摊铺温度不均区域（温差 $> 15^{\circ}C$ ），弥补传统取芯法的空间覆盖不足缺陷。检测项目设置全面覆盖面层抗车辙性（压实度）、结构承载力（厚度）及平整度需求，规范符合率达100%。

2. 自检与抽检协同机制

项目采用“施工方全检+监理抽检”的双控模式，自检与抽检比例严格按3:1执行（如RNK19+385-466右侧面层自检4点/抽检1点）。统计显示，自检合格率为94.2%（压实度）、抽检合格率91.5%，数据偏差率控制在 $\pm 3\%$ 以内，符合JTG 3450-2019中“自检覆盖100%作业面，抽检覆盖 $\geq 30\%$ ”的要求。针对LNK19+440~492左侧面层厚度自检合格率85%但抽检值偏差超限的异常情况，启动第三方复检程序，最终溯源为摊铺机仰角校准误差，验证了协同机制对质量风险的拦截效能。

（二）关键质量指标检测

1. 压实度检测分析

在广深高速新塘立交改造工程中，通过系统性钻芯法与数字化技术的集成应用，建立了覆盖全路段的压实度动态监控体系。针对传统检测方法的不足，项目团队提出“三阶段递进式”检测方案（如表1所示），结合加密取样与三维激光扫描技术，显著提升了检测精度与效率。

检测技术的创新应用要素如下：

(1) 空间加密采样：在规范要求的 200m 间距基础上，将主线检测点加密至 150m/处，匝道加密至 100m/处，重点接缝区域采用 50m 网格化布点。

(2) 大直径芯样分析：将标准芯样直径从 100mm 增至 150mm，芯样完整性提升 40%，可更准确反映层间黏结状态。

(3) 多维度数据融合：三维激光扫描生成的表面纹理深度分布图（精度 0.1mm）与芯样密度数据建立回归模型（ $R^2=0.89$ ），实现非破坏性压实度预测。检测结果显示，RNK20+420-750 段左幅接缝处检测发现，纹理深度 $> 0.8\text{mm}$ 的区域占检测面积的 12%，钻芯验证压实度仅 94.2%。经补压处理后，二次扫描显示纹理深度降至 0.5mm 以下，压实度提升至 96.8%，验证了检测体系的预警能力。

表 1 “三阶段递进式”检测方案

检测阶段	检测频率	技术手段	数据维度	异常响应时间
初检阶段	200m/处	常规钻芯法	单点密度	24h
精检阶段	50m/处	150mm 芯样 + 真空饱水试验	层间连续性	6h
复检阶段	实时监测	激光扫描 + AI 分析	三维纹理特征	实时

2. 厚度检测分析

本项目通过构建“过程动态控制 - 结果精准验证”的双闭环管理体系，系统解决了沥青面层厚度控制的行业性难题。在广深高速新塘立交改造工程中，针对匝道曲线半径小、纵坡变化频繁的特点，开发了基于 BIM 的厚度预控系统，实现施工参数的动态优化。技术体系创新体现在三个层面：

(1) 动态测量技术升级

突破传统直尺法单点测量的局限性，引入激光断面扫描仪进行全断面厚度监控。在摊铺机后方安装高精度激光传感器阵列（采样频率 200Hz），实时生成横断面厚度云图。当检测到厚度偏差 $> 0.5\text{cm}$ 时，控制系统自动调整熨平板仰角，使厚度波动范围从 $\pm 0.8\text{cm}$ 压缩至 $\pm 0.3\text{cm}$ 。例如，在 LWK20+160 右幅摊铺过程中，系统识别出局部超厚区域（最大偏差 +1.2cm），经自动调节后最终厚度稳定在 $12.0 \pm 0.2\text{cm}$ 。

(2) 隐蔽结构无损检测

采用探地雷达（GPR）与钻芯法的协同检测模式：

① GPR 预扫描：使用 1.5GHz 天线沿车道纵向扫描，生成介电常数分布图，提前识别基层不平整区域。在 LWK19+440 段发现 3 处基层凹陷（深度 $> 1\text{cm}$ ），经铣刨处理后摊铺厚度合格率提升至 100%。

② 智能定位钻芯：根据 GPR 数据自动避开钢筋密集区，通过北斗定位系统（精度 2cm）精确引导取芯位置。对匝道 LWK20+560 ~ 800 段的检测显示，厚度极差从传统方法的 0.6cm 降至 0.2cm。

(3) 全周期数据追溯

建立厚度 - 温度 - 碾压速度关联数据库，发现关键规律：

① 当摊铺温度低于 150°C 时，厚度偏差增大 2.3 倍

② 压路机速度每增加 1km/h，厚度损失率上升 0.15%

③ 芯样含水率 $> 1.5\%$ 时，厚度测量误差可达 $\pm 0.5\text{cm}$

在 LWK19+504 ~ LWK20+240 左外面层施工中，系统监测到摊铺温度骤降至 143°C （环境温度 28°C ，风速 5m/s ）。质量控制模块立即启动应急响应：

其一，关闭摊铺机前进速度至 1m/min ，减少混合料散热；

其二，调整夯锤冲击能量至最大档位，确保初始压实度 $\geq 88\%$ ；

其三，加密直尺测量至每 10m^3 点，动态修正松铺厚度系数。

最终该路段芯样实测厚度均值为 11.9cm （设计 12cm ），极差 0.2cm，验证了系统的自适应能力。

3. 平整度检测分析

沥青路面平整度是衡量行车舒适性与路面耐久性的核心指标，直接影响车辆动力荷载分布及水损害发生概率。在广深高速新塘立交改造工程中，由于匝道曲线半径小（最小 $R=60\text{m}$ ）、重载货车占比高（35%），对平整度控制提出了更严苛的要求。为对接缝处易错台、弯道区域碾压不均匀等技术难点，项目团队构建了“全域连续检测 + 关键部位强化”的立体化监控体系，通过多源数据融合与智能修正技术，将平整度合格率从行业平均 95% 提升至 100%。

本项目采用连续式平整度仪与三米直尺法的组合检测方案，兼顾效率与精度。具体来说：

(1) 连续式平整度仪：每车道连续检测，计算国际平整度指数（IRI）；

(2) 三米直尺法：在接缝、弯道等关键区域，每 100m 抽检 3 处，测量最大间隙值。

检测过程细节如下：

平整度仪检测前需在标准平台上校准，检测速度保持 8km/h ，每 10m 记录 1 组 IRI 值。三米直尺检测时，选择纵向接缝交叉点，将直尺紧贴路面，用塞尺测量最大间隙。例如，在 RNK20+420-750 右侧接缝处，检测间隙为 3.2mm、3.5mm、3.0mm，均低于 5mm 限值。对 IRI 值 $> 1.8\text{m/km}$ 的路段（如匝道 LWK20+240 ~ LWK20+560），采用铣刨机去除表层 2cm 后重新摊铺。

检测结果如下：

- (1) 主线 IRI 值：均值 1.3m/km (标准 \leq 2.0m/km)，合格率 100%，最平滑段 IRI 1.0m/km；
- (2) 匝道 IRI 值：均值 1.7m/km，合格率 100%；
- (3) 三米直尺检测：全线最大间隙 4.2mm，合格率 100%。

检测过程的质量控制要点如下：

- (1) 摊铺机夯锤与熨平板定期检修，消除机械振动导致的波纹；
- (2) 接缝处预留 30cm 冷接茬，下次摊铺前涂刷粘层油；
- (3) 碾压时设置 30cm 重叠带，避免接缝错台。

4. 渗水系数检测分析

本项目创新建立“材料-结构-工艺”三位一体的渗水防控体系，攻克了重载交通与多雨气候双重作用下的渗水控制难题。通过研发新型检测装备与改进施工工艺，使渗水系数合格率从行业平均 95% 提升至 100%。技术突破主要体现在以下方面：

(1) 多尺度渗流机理研究

采用 CT 扫描 (分辨率 $5\mu\text{m}$) 与数字图像处理技术，观察沥青混合料渗水通道的形成过程是否符合一般规律。具体来说：

- ① 2.36 ~ 4.75mm 骨料间隙是主要渗水路径，占总渗流量的 68%
- ② 油石比每增加 0.1%，渗水系数降低 8 ~ 12mL/min
- ③ 碾压遍数超过 6 次后，渗水系数降幅趋于平缓。

在此基础上，优化施工参数：将 AC-16C 型混合料的油石比从 4.6% 提升至 4.8%，终压温度从 90℃ 降至 85℃，使渗水系数均值从 110mL/min 降至 85mL/min。

(2) 研发智能检测装备。主要是研制具备压力补偿功能的路面渗水仪，解决传统设备的三大缺陷：

- ① 密封性提升：采用硅胶吸附底座 + 真空负压系统，使底座贴合度从 75% 提升至 98%
- ② 量程扩展：检测范围从 0 ~ 500mL 扩展至 0 ~ 2000mL，满足排水式路面的检测需求
- ③ 数据自动化：集成称重传感器与蓝牙传输模块，实现渗水量自动记录与异常报警

(3) 预防性修复技术体系。建立渗水系数分级处置标准，具体来说：

- 其一，当渗水系数不超过 80mL/min 时，进行常规养护；
- 其二，当渗水系数介于 81 ~ 100mL/min 时，处需要处理雾封层，时效为 2 小时；
- 其三，当渗水系数介于 101 ~ 120mL/min 时，需要铣刨 1cm+ 微表处，时效为 6h；

其四，渗水系数超过 120mL/min 时，需要置换结构层，修复时效为 24h。

在此基础上，应用快速修复材料：

- ① 纳米硅改性乳化沥青：渗透深度达 35mm，用于封闭 0.2 ~ 0.5mm 级微裂缝
- ② 聚合物基雾封层：形成 $20\mu\text{m}$ 厚憎水膜，使渗水系数降低 60% ~ 80%
- ③ 微波加热养护车：对渗水区域进行局部加热 ($140^\circ\text{C}/30\text{s}$)，恢复混合料密实度

比如在上述案例中的重载交通特征显著的 RNK20+420-750 段，初期检测发现渗水系数达 135mL/min。采用铣刨 1cm+ 微表处组合工艺处理，复检后渗水系数降至 75mL/min。持续监测显示，经 800 万 ESALs (等效单轴荷载) 作用后，处理区域仍保持渗水系数 $< 90\text{mL}/\text{min}$ ，验证了修复技术的耐久性。

此外，协同控制效果方面，数据分析表明，当压实度提升 1%、厚度偏差缩小 0.1cm 时，渗水系数可降低 8 ~ 10mL/min。在 LWK20+240560 段实施综合控制后，渗水系数从 105mL/min 降至 82mL/min，同时 IRI 值改善 0.3m/km，实现了质量指标的协同优化。

结语

综上所述，本研究基于广深高速新塘立交改造工程实践，系统构建了适应亚热带多雨气候与重载交通的沥青混凝土面层质量检测体系。通过加密钻芯法 (150m/点)、三维激光扫描及地质雷达检测，实现了压实度、厚度与渗水系数的精准控制，关键指标合格率达 100%。研究发现：摊铺温度 ($150 \sim 160^\circ\text{C}$) 与压路机速度 ($\leq 5\text{km}/\text{h}$) 的严格管控可显著提升压实均匀性；厚度偏差与材料离析、摊铺基准误差密切相关，动态调平技术将厚度波动压缩至 $\pm 2\text{mm}$ ；渗水系数与孔隙结构的关联分析表明，厚度增加 0.2cm 可使水损害风险降低 22%。未来，可进一步探索智能感知技术与无损检测方法的集成应用，推动道路工程质量向数字化、智能化方向发展。

参考文献

- [1] 杨康. 道路沥青混凝土面层质量检测分析 [J]. 江西建材, 2021, (01): 75-76.
- [2] 张继. 试论道路沥青混凝土面层施工技术及其改进措施 [J]. 四川水泥, 2020, (08): 266-267.
- [3] 路华猛. 道路沥青混凝土面层施工质量控制措施关键思路分析 [J]. 建筑技术开发, 2020, 47(09): 140-141.
- [4] 陈贤涛. 市政道路沥青混凝土面层施工技术的改进措施 [J]. 广东建材, 2020, 36(03): 64-66.

作者简介：刘宗博，男，1999 年，汉，湖南邵阳，本科，助理工程师，研究方向：道路与桥梁。