DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.250645

多维度无损检测技术在SMA路面施工质量控制的应用

郁德礼[1],杨　刚[2],陈　搏[3,4]

(1.广东省公路建设有限公司,广东 广州 510600; 2.葛洲坝交通投资有限公司,湖北 武汉 430000; 3.佛山大学 土木与交通学院,广东 佛山 528225; 4.广州肖宁道路工程技术研究事务所有限公司,广东 广州 510640)

摘　要: 为解决SMA混合料施工过程中的质量波动问题,引入了红外热成像探测系统、三维探地雷达系统、无核密度仪等多维度无损检测技术,以黄茅海通道项目为例,分别从SMA-13生产过程、摊铺、碾压及工后检测环节开展质量控制要点的应用研究。结果表明:基于拌和楼物料数据统计分析方法评估拌和楼计量系统的精准度,使用红外热成像系统监控沥青混合料出厂、运输、摊铺等环节的温度离析,可以有效保障SMA混合料生产过程的稳定性;根据无核密度仪研究的碾压环节混合料压实度变化规律,推荐了SMA-13的有效碾压工艺组合,该组合可使路面压实质量提升超过15%;使用三维探地雷达开展混合料初始压实度变化对厚度合格率的影响研究,发现当SMA混合料初始压实度为90%以上时,混合料预压密实,碾压沉降量一致,可以实现沥青层厚度合格率99%以上。

关键词: SMA混合料;无损检测技术;生产稳定性;压实度;厚度

中图分类号: U416.217;TU997　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)01-0334-07

Application of Multi-dimensional Non-destructive Testing Technology in Quality Control of SMA Pavement Construction

YU Deli[1], YANG Gang[2], CHEN Bo[3,4]

(1. Guangdong Provincial Highway Construction Co., Ltd., Guangzhou 510600, China; 2. Gezhouba Group Transportation Investment Co., Ltd., Wuhan 430000, China; 3. School of Civil Engineering and Transportation, Foshan University, Foshan 528225, China; 4. Guangzhou Xiaoning Road Engineering & Technology Research Office Co., Ltd., Guangzhou 510640, China)

Abstract: To solve the quality fluctuation problem during the construction process of SMA mixture, the multi-dimensional non-destructive testing technologies such as infrared thermal imaging detection system, three-dimensional ground-penetrating radar system and nuclear-free density meter are introduced. Taking the Huangmaohai Channel Project as an example, the application research on key points of quality control is carried out respectively from the production process, paving, rolling compaction and post-construction inspection links of SMA-13. The results show that evaluating the accuracy of the measurement system of the mixing plant based on the statistical analysis method of material data of the mixing plant and using the infrared thermal imaging system to monitor the temperature segregation in the links of asphalt mixture leaving the factory, transportation and paving can effectively guarantee the stability of the SMA mixture production process. The variation law of the compaction degree of the mixture in the rolling compaction process is studied by using a nuclear-free density meter. The effective rolling compaction process combination of SMA-13 is recommended. This combination can make the compaction quality of the pavement improved by more than 15%. The influence of the initial compaction degree change of the mixture on the qualified rate of thickness is studied by using three-dimensional ground-penetrating radar. It is found that when the initial compaction degree of SMA mixture is above 90%, the pre-compacted mixture is dense and the rolling compaction settlement is consistent, which can achieve an asphalt layer thickness qualification rate of over 99%.

Keywords: SMA mixture; non-destructive testing technology; production stability; compaction degree; thickness

0　引　言

SMA沥青混合料因其“粗骨架-细填充”的特殊级配结构,在高温稳定性和抗滑性能方面具有显著优势,但这也导致其施工质量控制面临独特挑战。

收稿日期: 2025-06-24

作者简介: 郁德礼(1997—),男,硕士,工程师,从事高速公路路面施工管理工作。

通信作者: 陈搏(1991—),男,博士,讲师,从事沥青路面设计与应用技术研究工作。电子信箱:857615741@qq.com

国内外研究表明，SMA 混合料的质量波动主要特征是：纤维稳定剂的加入使混合料黏度提升40%~60%，导致拌和过程中易出现纤维结团和沥青胶浆分布不均[1-2]。由于SMA 混合料粗集料占比高，碾压过程中存在明显的“骨料破碎-玛蹄脂上浮”现象。对于我国32个高速公路项目的调查显示，依靠经验公式确定的碾压工艺导致压实不足与过压现象并存，局部区域空隙率波动较大，早期破坏频繁出现[3]。现行施工技术规范仍以钻芯取样为基准方法，德国研究证实，单个芯孔会造成约 15 cm^2的结构损伤，美国NCHRP Report 634指出，钻芯取样法会造成约7%的有效路面面积损失[4-5]。

对于沥青路面，其施工关键环节包括生产、运输、摊铺和碾压成型等，任何一个环节出现波动都会产生一系列的问题叠加，影响最终的实体质量[6]。混合料生产环节主要体现在级配控制不足和温度控制不稳定。传统拌和站依赖人工调整冷料仓比例，易出现集料级配波动，导致流值、孔隙率超标；振动筛筛孔尺寸设置不合理会加剧离析。温度管理粗放，缺乏实时温控系统，沥青混合料温度不均匀现象普遍，SMA 混合料高温拌和窗口更易出现局部过热。运输过程问题主要是保温措施不到位，容易产生温度离析，单层篷布覆盖导致的料温损失可达 10 ℃/h以上，车厢边缘混合料则温度骤降。卸料时未执行“前-后-中”分层装料法，粗集料集中现象严重。摊铺过程施工缺陷主要为布料均匀性及初摊时振捣密实度波动。摊铺机螺旋叶片磨损或高度设置不合理，加剧横向离析。厚度控制滞后，依赖人工测量松铺厚度，响应速度慢于机械作业节奏。碾压环节的工艺参数固化，机械吨位不足，复压未按混合料类型选择合适设备，温度监测缺失，导致改性沥青层压实度不足，钢轮压路机锈蚀污染表面，出现泛白现象等[7]。各环节问题存在连锁反应，如运输离析导致的摊铺温度不均，会引发碾压不密实，最终形成车辙、松散等病害[8]。

近年来，不少学者开展了沥青混合料施工质量研究。程德金等[9]通过设置拌和楼成品料仓的温度传感器，研究了沥青混合料储存过程中的温度变化规律，提出了SMA 混合料温度衰减曲线的预测模型。杨智敏等[10]通过设计级配离析、温度离析试验方案来模拟施工过程的混合料质量波动，获得了不同离析状态下的水稳定性衰减规律，明确了离析对沥青混合料长期性能的影响。赵毅等[11]采用数字图像处理技术，评价了沥青混合料施工过程均匀性，探讨了沥青混合料摊铺表面和压实沥青混合料表面集料二维均匀性及结构集料三维均匀性评价方法。国际上，美国联邦公路局（FHWA）[12]通过 PGSS 系统，实现了拌和楼生产数据的实时监控，但针对 SMA 混合料特有的纤维分布均匀性缺乏有效监测手段。挪威SINTEF 研究所开发的 COMPACT 系统将无核密度仪（PQI）用于碾压轨迹规划，但其密度预测模型在SMA混合料中误差较大[13]。我国《公路沥青路面施工技术规范》（JTG F40—2004）虽规定了 SMA 压实度标准，但未给出工艺参数动态调整方法。因此，在SMA混合料施工工艺及质量控制方面，仍然参考 AC 混合料的传统方法，导致其施工质量难以实现设计的高性能磨耗层服役寿命目标。

为提升SMA 混合料施工质量，本文以黄茅海通道项目为例，在关键施工环节引入多维度无损检测技术，分别从SMA-13 生产过程、摊铺和碾压环节开展监控，重点考虑工程中典型工况条件，并通过科研路段检测结果来验证此技术的应用效果。

1　工程概况

1.1　工程简介

粤港澳大湾区交通网络中的重要组成部分——黄茅海跨海通道，其东侧与鹤港高速（港珠澳大桥的西部延伸段）相连，西侧则衔接西部沿海高速及新台高速。该交通工程线路起点位于珠海市平沙镇前西社区，终点设在台山市斗山镇，路线总长度达 31.11 km，按照双向 6 车道的高速公路标准建设，最高设计行车速度为 100 km/h。桥位区属亚热带海洋性气候，年均气温 22.6~22.9 ℃，极端温度区间为-0.1~38.7 ℃。年均降水量 1 942~2 005 mm，降水季节分布不均。项目设计年限内，大型车辆通行量达 10 002 624 辆，荷载等级为重交通。沥青面层采用 18 cm 结构，即厚 4 cm SMA-13（改性）+厚 6 cm AC-20C（改性）+厚 8 cm AC-25C。其中，作为直接与车辆轮胎接触，且暴露于外界环境的SMA-13 路面的施工质量是影响项目成败的关键。

1.2　原材料

（1）SMA 面层沥青主要采用广州新粤沥青有限公司供应的SBS（I-D）改性沥青，沥青的路用性能分级为PG76-22，其主要性能指标见表1。

（2）SMA 面层粗集料采用贵港市石牛岭石场的10~15、5~10、3~5 mm 碎石；细集料采用相同石场的

表1　沥青性能指标

试验项目	技术要求	试验结果	单项评定
针入度(25 ℃，100 g，5 s)/(0.1 mm)	40~60	52	合格
针入度指数PI	+0	+0.27	合格
延度(5 ℃，5 cm/min)/cm	20	35	合格
软化点$T_{R\&B}$/℃	70	84.5	合格
闪点/℃	230	337	合格
溶解度/%	99	99.8	合格
存储稳定性(163 ℃，48 h下软化点差)/℃	2.5	1.5	合格
弹性恢复(25 ℃)/%	80	96	合格

同母岩0~3 mm机制砂。粗集料性能指标见表2。

表2　粗集料性能指标

检验指标	技术要求	试验结果	单项评定
石料压碎值/%	≤20	11.2	合格
洛杉矶磨耗损失/%	≤22	11.8	合格
表观相对密度	≥2.70	2.942	合格
吸水率/%	≤1.5	0.59	合格
与改性沥青的黏附性/级	≥5	5	合格
磨光值	≥42	44	合格

(3)SMA沥青混合料中所使用的矿物填料，是通过将石灰岩研磨加工而成的细颗粒材料。矿物填料需满足干燥无水分、无杂质污染的质量要求。

(4)木质纤维是SMA-13沥青混合料的关键添加材料，主要通过吸附、稳定和增强机制来提升混合料性能。木质纤维能吸收自身重量4~8倍的沥青，增厚沥青油膜，延缓老化进程，提高混合料耐久性；其三维网状结构能增强集料骨架，提供力学支撑，改善混合料高温抗车辙性能和低温抗裂性；纤维内部空隙能缓冲沥青膨胀，防止夏季高温下自由沥青析出，保持混合料稳定。该项目木质纤维采用德国瑞登梅尔父子公司的粒状木质纤维，经检测，其各项指标均满足设计和规范《公路沥青路面施工技术规范》要求，见表3。

表3　木质纤维性能指标

检测指标	技术要求	试验结果	单项评定
纤维吸油率/%	4~8	4.2	合格
纤维含水率/%	≤5	0.5	合格
纤维pH值		7.4	
纤维灰分含量/%	12~22	17.6	合格
纤维密度/(g·cm^{-3})		0.85	

1.3　配合比设计

在南方高温多雨地区，SMA-13沥青混合料的配合比设计需兼顾高温稳定性、抗水损害性和耐久性。其核心原理为：采用体积法设计高比例粗集料骨架，形成嵌挤结构以抵抗高温车辙；为提高SMA混合料的水稳定性，通过高沥青用量、大比例填料及添加木质纤维吸附多余沥青，实现较低空隙率设计，防止雨水渗透；应用SBS改性沥青，增强黏结力和温度敏感性。配合比设计过程分为3个阶段：首先进行目标配合比设计，其次开展生产配合比设计，最后完成生产配合比验证。SMA-13生产配合比为：$m_{11\sim15\ mm}$：$m_{6\sim11\ mm}$：$m_{4\sim6\ mm}$：$m_{0\sim4\ mm}$：$m_{矿粉}$：$m_{水泥}$=36∶36∶4.5∶13.5∶9∶1，纤维掺量0.3%，油石比6.1%。

对SMA-13沥青混合料的各项性能进行验证，所得试验结果见表4。

表4　SMA-13沥青混合料性能试验结果

结构类型	检测结果	设计要求值
空隙率/%	4.0	3.0~4.5
间隙率/%	17.3	≥17.0
饱和度/%	76.6	75~85
稳定度/kN	9.04	≥6.0
流值/(0.1 mm)	33.3	
VCA_{min}/%	39.61	VCA_{DRC}≥
VCA_{DRC}/%	41.57	VCA_{min}
70 ℃动稳定度/(次·mm^{-1})	6258	≥3 500
残留稳定度/%	92.8	≥80
渗水系数/(mL·min^{-1})	5	≤80
谢伦堡沥青析漏试验的结合料损失/%	0.03	≤0.1
浸水飞散试验/%	1.1	≤15

注：试件击实温度为175 ℃。

2　无损检测技术介绍

2.1　三维探地雷达

三维探地雷达系统作为一种集成现代电子技术、信息处理技术与电磁波探测技术于一体的先进无损检测系统，其核心功能在于实现道路结构的快速全断面扫描检测。该系统工作原理基于脉冲式高频电磁波发射与接收机制：通过向地下介质发射纳秒级电磁脉冲，接收来自不同介电常数界面的反射信号，结合高精度实时动态差分定位系统(RTK)实现厘米级空间定位，最终通过信号处理算法反演出路面结构层厚度、介电常数及空隙率等关键参数指标。

图1展示了典型的三维探地雷达剖面图像，其中横轴(X轴)表征测线方向累计里程，纵轴(Y轴)表示地下介质深度分布，图像灰度变化对应电磁波反射强度，可直观反映道路结构层界面及内部异常特征。

三维探地雷达系统采用下式计算检测区域内各

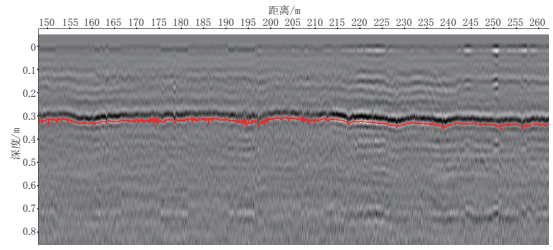

图 1　沥青路面结构层识别雷达图（单位：m）

测点厚度值 h：

$$h = \frac{c(t_2' - t_1')}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{1}$$

式中：t_1' 为测点位空气-沥青层界面反射电磁波传播时间；t_2' 为测点位沥青层-基层界面反射电磁波传播时间，c 为光速；ε_r 为相对介电常数。

三维探地雷达通过高频电磁波穿透路面获取数据，全过程无需破坏路面结构层。传统钻芯法需钻孔取样，不仅形成结构性损伤，还会诱发隐性病害（如层间脱空、进水等），进而降低路面耐久性。

2.2　无核密度仪

核子密度仪作为近 40 年来土工材料密度检测的基准方法，凭借其精度高、效率快和无损特性而被广泛应用。但公众对其辐射产生放射性同位素的顾虑催生了无核技术发展。无核密度仪通过环形电极产生电磁场来测定沥青混合料介电常数，基于集料（介电常数约为 4~8）、沥青（介电常数约为 2.6~3.0）与空气（介电常数约为 1）的三相介电差异实现密度反演。

采用 PQI380 无核密度仪测定沥青路面毛体积密度，计算出沥青路面空隙率，一方面可以快速检测沥青路面的压实度状态，另一方面可以大面积评价路面的空隙率分布均匀性，进而评估压实效果或离析程度。

由于沥青混合料类型对检测结果有所影响，需要在施工结束后进行无核密度结果的标定。具体操作为：在施工后的 SMA 路面，选择 6 个点位测得无核密度；然后测试 6 个点位芯样的实际密度值；建立无核密度值 x 和芯样密度值 y 的相关性关系（该项目为 y=0.607 2x+968.24，R^2=0.926）；最后，对无核密度值进行补偿修正。

结合 SMA-13 混合料密实特性，按空隙率的范围分为：严重细离析、中度细离析、非离析、中度粗离析、严重粗离析 5 种离析程度（见表 5），作为后续质量改进的依据。

2.3　红外热成像技术

沥青混合料的性能与混合料的施工温度密切相关，温度离析不仅影响沥青混合料的密度，而且对空隙率也会产生较大影响。美国华盛顿州公路局研究表明，若沥青混合料温度差异超过 14 ℃，则难以压实，混合料空隙率将增加 2%，路面寿命将减少 20%~50%，导致公路建设投资的巨大浪费。

表 5　SMA-13 沥青路面离析标准

空隙率范围/%	离析程度	备注
0~2	严重细离析	混合料压实过度或细料严重集中
2~3	中度细离析	混合料压实略过度或细料稍集中
3~4.5	非离析	混合料压实良好/摊铺布料均匀
4.5~6	中度粗离析	混合料压实不足或粗集料集中
>6	严重粗离析	混合料压实严重不足或粗集料非常集中

现代红外热成像设备主要由三大部分构成：红外光学探测单元、电子信号处理模块和图像显示终端。该设备的工作原理是：首先接收目标物体发出的红外辐射，将其转换为电信号，经过信号放大和温度补偿等电路处理后，最终在显示屏上以伪彩色图像的形式直观呈现被测物体的温度分布情况（见图 2）。这一技术基于普朗克辐射定律，通过检测沥青混合料表面发出的红外辐射，将其转换为相应的电信号输出，其数学表达式为：

$$V_s = W(\lambda, T) \times A_0 \times \tau_0 \times R \tag{2}$$

式中：V_s 为输出电平信号，dB·W；A_0 为光学系统有效孔径，cm；τ_0 为光学透过率，%；R 为光学影响度参数；W 为传感器接收到的辐射能量，J；λ 为红外辐射波长，μm；T 为被测物体的温度值，℃。

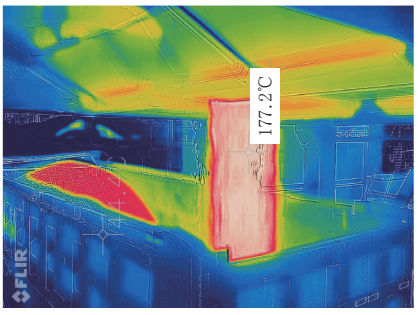

图 2　沥青混合料红外图像

3　施工关键环节质量控制

3.1　混合料生产过程的稳定性控制

沥青混合料生产稳定性主要包括：各种材料的计量精准、混合料温度稳定、混合料合成级配与设计级配偏差小这 3 个方面。

3.1.1　混合料产能稳定性分析

根据玛连尼 5000 型沥青拌和楼系统数据统计，

8:00开始生产，至11:25结束，历时3 h 25 min，共出料688.44 t。出料平均值约201.3 t/h，实际生产过程中拌和楼设置产量为216 t/h。实际产能与设置产能基本匹配，沥青拌和楼的生产状况良好。对生产的164盘混合料数据进行稳定性分析。

沥青混合料的生产数据汇总见表6。

表6　沥青混合料的生产数据汇总　　单位：%

项目	集料				矿粉	水泥	油石比
	11~15 mm	6~11 mm	4~6 mm	0~4 mm			
最大值	36.56	36.63	5.04	14.52	9.15	1.20	6.15
最小值	35.42	35.23	4.07	12.20	8.82	0.68	6.04
平均值	36.01	35.98	4.52	13.52	9.00	1.00	6.10
标准差	0.22	0.24	0.18	0.42	0.07	0.09	0.04
生产配合比	36.0	36.0	4.5	13.5	9.0	1.0	6.1
偏差	0.01	−0.02	0.02	0.02	0	0	0

根据表6统计，各种材料的掺配比例与预定的生产配合比的误差不大，拌和楼计量系统较精准。

3.1.2　混合料温度稳定性控制

采用FLIR-3型红外热像仪（热灵敏度70 mK，图像分辨率160像素×120像素，精度±0.5 ℃），严格控制测温距离约2 m进行检测，测试过程避免沥青烟雾干扰。分别采集SMA混合料出厂、到场、摊铺环节的每车混合料温度，统计不同车次混合料温度代表值，绘制温度统计图（见图3）。

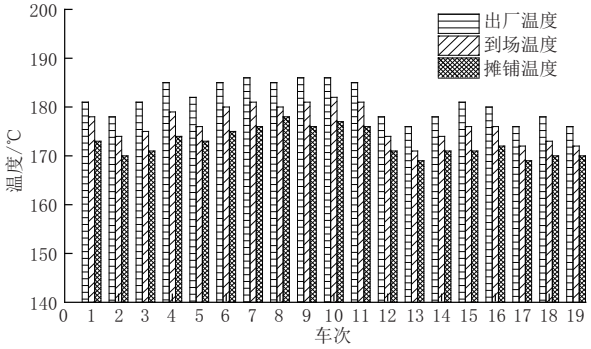

图3　各料车混合料温度统计

SMA混合料搅拌后出厂的温度范围为176~186 ℃，从拌和站到施工现场的温度范围为171~182 ℃，摊铺时的混合料温度范围为169~178 ℃。根据SMA混合料施工温度特性，摊铺环节的SMA混合料内部温度不宜低于160 ℃。因此，需要做好拌和楼生产过程中的加热滚筒温度控制（190~210 ℃）、运料车运输过程中的保温措施（如车厢体四周宜加设保温夹层，混合料表面加盖棉被和厚苫布等）。此外，冬季低温或大风天气施工时，建议提高混合料出厂温度约5~10 ℃，避免运输和施工过程温度散失过快。

3.1.3　混合料级配稳定性分析

SMA混合料燃烧筛分试验是控制其路用性能的核心检测手段。首先，通过高温燃烧完全分解有机质（沥青和纤维），直接测量残留矿料质量差值，计算实际油石比；其次，对燃烧后的矿料进行筛分，分析关键筛孔（如9.5、4.75、0.075 mm）通过率；最后，对比设计级配与实际混合料级配的偏差，评价沥青混合料的施工稳定性。对SMA沥青混合料进行燃烧筛分，发现矿料筛分结果与生产配合比偏差在1.1%以内，油石比偏差在0.01%以内，均满足设计要求。

3.2　碾压过程的压实度控制

SMA-13混合料作为沥青路面磨耗层，其性能需要兼顾沥青路面的结构力学性能与路表抗滑功能。传统的模糊碾压工艺往往导致沥青磨耗层过压而出现构造磨损问题，但是盲目减少碾压遍数，又会产生压实度不足的质量问题。针对沥青路面施工过程中碾压工艺对表层构造的损伤问题，通过引入PQI380无核密度检测技术，系统考察了碾压遍数与路面压实度之间的变化规律。现场选择的3个测点中，2个测点为正常温度（表面约165 ℃），1个测点为表面温度偏低约20 ℃。压实度变化见图4。

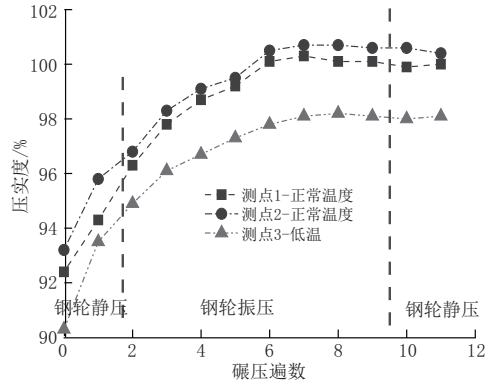

图4　不同碾压条件下的压实度变化

试验结果显示，在正常温度下，双钢轮碾压6遍后，SMA-13的压实度达到峰值；之后继续开展振动碾压，反而出现压实度变小的现象，说明此时沥青混合料内部从最紧密状态被过压振散，此时的振动能

量会加剧路表棱角的磨损破坏。而在混合料表面温度偏低时，复压过程的压实度明显偏低，即使增加碾压遍数，也无法有效提高混合料压实度。因此，建议SMA-13混合料应在165 ℃以上开展碾压，有效碾压工艺为“1~2遍钢轮静压+6遍钢轮振压+1~2遍钢轮静压收光”。

基于有效压实度的碾压工艺方案，开展了SMA-13路面的大面积施工。为评价压实效果，对碾压工艺优化前后的路段各选取20 m段落开展全断面检测，在垂直桩号方向和桩号方向的测点间距均为1 m，待检区域共采集315个数据。

PQI380无核密度仪通过电磁感应技术检测沥青路面的密度均匀性，并自动输出平均密度和压实度数据。根据无核密度仪检测结果得出毛体积密度，见表7。

表7　毛体积密度值统计

桩号	平均值	标准差	变异系数/%
K18+800 ~ K18+820	2.512	0.042	1.67

将无核密度仪检测得到的毛体积密度换算成沥青层空隙率，绘制碾压工艺优化前后的空隙率分布图（见图5）。可以看出，碾压工艺优化前，正常路段（非离析）比例为35.2%，过压实（细离析）比例为50.9%，欠压实（粗离析）比例为13.9%。采用传统的模糊碾压工艺，主要呈现过压为主，但是也存在局部的漏压、欠压现象，不利于路面质量稳定。采用推荐的碾压工艺组合后，正常路段（非离析）比例为50.7%，过压实（细离析）比例为39.5%，欠压实（粗离析）比例为9.8%，欠压与过压现象明显减少，路面实体质量提升幅度超过15%。结合现场路面状态，欠压实（粗离析）主要位于两侧边部0~1 m范围，与压路机边部碾压遍数偏少、摊铺机边部粗集料聚集等因素有关。过压实（细离析）主要集中在道路中部，主要与压路机在路面中间重叠碾压过多，实际碾压遍数增加有关。

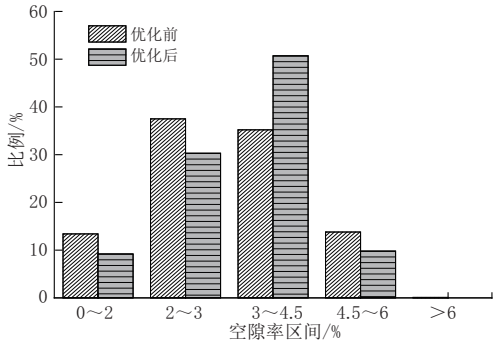

图5　碾压路段优化前后的空隙率统计

3.3　施工厚度均匀性控制

采用DXG系列空气耦合天线阵在横断面方向依次平移覆盖整个待检区域，对试验路段范围区域采集9道检测数据，每100 m可采集460 329个数据点，基本覆盖全路幅断面，达到评价沥青层厚度均匀性的目标。为保证雷达扫描结果准确可靠，均在路表干燥状态下开展检测。

影响沥青面层施工厚度均匀性的因素主要包括松铺系数、下承层平整度、摊铺方式等，而对于上面层SMA-13混合料来说，该阶段的摊铺机处于施工末期阶段，出现了一定的磨损，尤其影响其振捣效果，进而出现初摊混合料的初始压实度波动问题。为此，使用无核密度仪，筛选初始压实度约80%和90%段落，再使用三维探地雷达进行全断面厚度的扫描。2个路段的厚度统计见表8。

表8　不同路段SMA-13面层厚度表

路段	各种厚度所占比例/%			厚度均值/cm
	<3.60 cm	3.60~4.40 cm	>4.40 cm	
路段一（初始压实度80%）	6.36	58.28	35.36	4.1
路段二（初始压实度90%）	0.69	74.82	24.49	4.4

由表8可知，在相同的摊铺方式和松铺系数下，当初摊的SMA混合料初始压实度不同时，会出现厚度的明显差异。初始压实度为80%左右的路段，甚至出现6.36%路段厚度不合格问题，厚度合格率不足95%。究其原因，摊铺层混合料松散，碾压后沉降量不均匀，容易导致厚度偏差波动。而正常摊铺路段，初始压实度为90%以上，混合料预压密实，碾压沉降量一致，可以实现沥青层厚度合格率99%以上。此外，混合料松散导致熨平板牵引力波动，摊铺表面易形成波浪，也会导致路表平整度较差。因此，需要在大面积施工及工程末期及时对摊铺设备进行维护，确保摊铺机熨平板振捣频率稳定、匹配合理和连续的摊铺速度（约2~3 m/min），进而提升沥青面层的厚度质量。

4　实体质量检测评价

基于前述的关键技术要点控制，开展了项目的大面积施工，从SMA面层的路用性能和使用功能进行质量评价。实体工程的质量检测结果如下：

（1）SMA-13面层的渗水系数为0~30 mL/min，均值为10 mL/min左右，满足南方地区密水性设计要求（不大于80 mL/min）。

（2）采用连续式平整度仪检测路面平整度标准差，数值位于0.5~0.8 mm范围，均值为0.71 mm，合格率100%，满足设计要求（不大于1.0 mm）。

（3）开展路面抗滑性能评价，SMA路面构造深度为1.1~1.3 mm，均值为1.17 mm，满足设计要求（不大于0.8 mm）。进行摩擦系数检测，SMA路面摆值为60~80 BPN，均值为74 BPN，满足规范要求。

5 结　语

（1）基于拌和楼物料数据统计分析方法评估拌和楼计量系统的精准度，使用红外热成像系统监控沥青混合料出厂、运输、摊铺等环节的温度离析，可以有效保障SMA混合料生产过程的稳定性。

（2）采用无核密度仪研究碾压环节的混合料压实度变化规律，兼顾路面压实性能和抗滑功能，推荐了SMA-13的有效碾压工艺组合“1~2遍钢轮静压+6遍钢轮振压+1~2遍钢轮静压收光”，优化碾压工艺后的路段欠压和过压现象明显减少，路面实体质量提升幅度超过15%。

（3）使用三维探地雷达开展沥青路面厚度的全断面扫描，当SMA混合料初始压实度为90%以上时，混合料预压密实，碾压沉降量一致，可以实现沥青层厚度合格率99%以上。

参考文献：

[1] 艾长发，张家康，焦方辉，等.混合正向组合预测和逆向目标优化的沥青混合料配合比设计[J].东南大学学报（自然科学版），2025，55（2）：496-503.

[2] 高尚，王友，杨春，等.SMA-13沥青玛蹄脂混合料配合比设计[J].科学技术创新，2025（1）：153-157.

[3] 季节，于淼章，王玉果，等.沥青混合料工作性能研究综述[J].中国公路学报，2024，37（9）：170-185.

[4] SUN C, LI P, MA Y, *et al*. Experimental simulation evaluation and control measures of paving segregation for the stone matrix asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2024, 440：137360-137360.

[5] AI X, YI J, PEI Z, *et al*. Advances in discrete element modeling of asphalt mixture: A literature review[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2024, 31（7）: 4003-4029.

[6] 肖敏敏，程韦，杨礼明.考虑沥青混合料空隙率的蠕变特性及改进Burgers模型[J].科学技术与工程，2023，23（4）：1698-1708.

[7] 陈伟，韦金城，徐希忠，等.不同钢渣掺量的沥青玛蹄脂碎石混合料路用性能[J].科学技术与工程，2022，22（21）：9331-9338.

[8] 汪志勇，刘威，李明宸.硬质沥青混合料生产及施工工艺研究[J].城市道桥与防洪，2025（4）：230-233.

[9] 程德金，杨凯，白旭耀，等.成品仓储存过程中沥青混合料温度衰减分析[J].内蒙古公路与运输，2022（1）：48-52.

[10] 杨智敏，曾国鹏，郭寅川，等.离析对湿热地区沥青混合料长期水稳定性的影响[J].硅酸盐通报，2022，41（3）：1094-1101.

[11] 赵毅，杨旋，郝增恒，等.沥青混合料均匀性数字图像评价方法研究进展[J].材料导报，2020，34（23）：088-23099.

[12] ZHAO J, WANG H. Machine learning based pavement performance prediction for data-driven decision of asphalt pavement overlay[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2025, 21（6）: 940-955.

[13] BISANTI F, CARBUTTI N, DAVE V E, *et al*. Influence of compaction methods on physical-mechanical properties of cold recycled asphalt mixtures and pavement life[J]. Road Materials and Pavement Design, 2025, 26(1): 400-416.