

公路工程中沥青混合料的试验检测技术及其优化应用

王鹏宇

四川精益达工程检测有限责任公司 四川成都 610000

摘 要：本文围绕公路工程中沥青混合料的质量控制需求，系统梳理了沥青混合料试验检测技术的核心方法与现存问题，提出基于智能化检测设备与材料性能优化的技术升级路径。通过分析传统检测技术的局限性，结合新型检测技术（如无损检测、大数据分析）的融合应用，探讨沥青混合料性能评价的精准化与高效化方向。同时，结合工程实践案例，验证优化技术对提升路面耐久性、降低全生命周期成本的实践价值，为公路工程建设提供技术参考。

关键词：公路工程；沥青混合料；试验检测技术

引言

公路工程的质量与使用的材料密切相关，其中沥青混合料作为路面的主要材料，其性能和质量对公路的耐久性和安全性起着决定性作用。随着交通量的增加和车辆荷载的加重，对沥青混合料的性能要求越来越高。因此，准确、有效的试验检测技术对于确保沥青混合料的质量至关重要。现有的试验检测技术虽然能够满足基本要求，但在实际应用中仍存在问题，如检测效率低、精度不足等。因此，研究和优化沥青混合料的试验检测技术，对于提高公路工程质量具有重要的现实意义。

1 沥青混合料传统试验检测技术的现状与局限

1.1 常规检测技术体系及核心指标

在公路工程建设中，沥青混合料性能直接影响路面质量，常规检测技术体系围绕材料力学性能与体积特性构建。马歇尔试验作为经典检测手段，通过对圆柱形试件施加竖向荷载，测定稳定度与流值两项核心指标。稳定度反映沥青混合料抵抗破坏的最大荷载，体现材料的整体强度；流值则表征试件达到最大荷载时所产生的垂直变形，二者结合可评估沥青混合料在常温下的综合力学性能。试验过程严格遵循操作规范，从试件制备时的击实次数控制、温度保持，到加载速度设定均有明确标准，以保证数据准确性与可重复性，其结果广泛应用于沥青混合料配合比设计与质量验收环节。

车辙试验则聚焦沥青混合料高温稳定性评估，通过模拟车辆轮胎在路面上的往复碾压，测定试件在规定温度与时间内的变形量，进而计算动稳定度指标。该指标表示沥青混合料每产生 1mm 变形所需的轮胎碾压次数，数值越高，表

明材料抗车辙能力越强。在重载交通频繁的路段，动稳定度是衡量路面耐久性的关键参数，能直观反映沥青混合料在持续高温与重载作用下抵抗塑性变形的能力。但试验过程需精确控制温度（通常为 60℃）、荷载大小与碾压频率，以模拟真实路面环境，其结果为高温地区或交通繁忙路段的路面材料选型与设计提供重要依据。

1.2 传统技术的局限性分析

传统沥青混合料试验检测技术以抽样检测为基础，从施工现场采集样品后，需在实验室完成制样、测试等流程，整个周期通常需要数小时甚至数天。例如马歇尔试验从样品制备到结果得出，往往需要 3–4 小时，若涉及配合比调整或复检，耗时更长。这种滞后性导致检测结果无法及时反馈至施工过程，难以对生产环节进行实时纠偏。一旦发现质量问题，可能已有大量不合格材料被用于工程建设，造成资源浪费与工期延误。同时，抽样检测本身存在样本代表性不足的风险，难以覆盖整个施工区域，无法实现对沥青混合料生产、运输、摊铺、压实全流程的动态监控。

在指标评价方面，传统检测技术多聚焦单一性能参数，如马歇尔稳定度仅反映常温下的力学强度，动稳定度侧重高温抗变形能力，缺乏对材料综合性能的系统评价。实际工程中，沥青路面需同时承受高温、低温、雨水侵蚀、车辆荷载等多重作用，传统指标难以全面反映材料在复杂环境与荷载耦合条件下的性能演变规律。例如在北方高寒地区，路面不仅要具备良好的高温稳定性，还需抵抗低温开裂，但现行检测体系中缺乏能有效模拟极端低温环境与车辆急刹车、加速等动态荷载共同作用的试验方法，导致部分路面虽通过常规

检测验收,却在投入使用后短时间内出现裂缝、坑槽等病害。

2 沥青混合料试验检测技术的优化方向与创新应用

2.1 智能化检测设备的研发与应用

在信息技术与工程检测深度融合的背景下,智能化检测设备正成为沥青混合料质量控制的核心支撑。基于物联网的实时监测系统通过构建全流程感知网络,实现了对混合料生产环节的动态化、精准化监控。在拌合阶段,耐高温的埋入式温度传感器被嵌入沥青搅拌锅与集料输送管道,以每秒 5 次的高频次采集温度数据,经无线传输模块实时同步至云端数据库。例如,某高速公路施工现场的拌合站部署了分布式温度传感器网络,当沥青加热温度超过 175℃(设定预警阈值)时,系统自动触发搅拌设备的功率调节机制,并向操作员发送手机短信预警,将沥青老化率从传统工艺的 8% 降至 3%。摊铺环节的密度监测则依赖集成于摊铺机熨平板的阵列式压力传感器,这些传感器通过电荷耦合技术实时感知混合料摊铺后的压实程度,结合全球定位系统(GPS)定位数据,可生成精度达 0.5 平方米的密度分布热力图。施工人员通过平板电脑查看实时数据,对密度低于设计值 96% 的区域立即进行二次碾压,使路面压实度合格率从 92% 提升至 98%。

图像识别与无损检测技术的突破,为沥青混合料缺陷检测提供了非接触式解决方案。红外热成像仪利用 8-14 微米波长的红外辐射成像原理,对刚摊铺的路面进行快速扫描,通过分析表面温度场分布识别内部缺陷。当路面存在离析或压实不足时,缺陷区域因热传导效率差异,在热成像图中呈现 2-5℃ 的温度梯度差,检测精度可达 0.3 毫米裂缝宽度。某城市快速路施工中,红外热成像技术在 2 小时内完成了 5 公里路面的检测,发现并标记了 12 处隐蔽性裂缝,较传统人工巡查效率提升 10 倍。激光扫描技术则通过高速旋转的激光头发射百万级点云数据,构建路面三维纹理模型,基于机器视觉算法识别集料离析区域。

2.2 材料性能优化与检测技术协同发展

温拌沥青技术的推广应用对检测技术提出了适应性改进需求。温拌剂(如蜡基、有机胺类)的掺入使混合料拌合温度降低 30-50℃,但也改变了沥青与集料的界面作用机制,传统检测指标已无法全面反映其性能特征。在工作性检测中,除沿用坍落度试验评估混合料流动性外,动态剪切流变仪(DSR)被用于测定 60℃ 时的复数模量(G^*)与相位

角(δ),通过计算抗车辙因子($G^*/\sin \delta$)评估温拌沥青的高温粘弹性。某温拌沥青混合料的 DSR 测试显示,当温拌剂掺量为 0.8% 时,抗车辙因子较热拌混合料降低 12%,但通过调整矿料级配,可将其恢复至热拌水平。路用性能检测方面,汉堡车辙试验被引入以模拟重载交通条件,该试验通过 50℃ 恒温环境下的往复加载,测定混合料的变形速率,当变形量达到 20 毫米时的加载次数(动稳定度)较传统车辙试验更贴近实际路况。

再生沥青混合料的质量控制核心在于建立旧料掺配比例与新沥青性能的量化关联模型。在原材料检测阶段,荧光显微镜被用于观察旧沥青与新沥青的微观相容性,当旧料掺量超过 40% 时,可见明显的两相分离结构,需通过添加再生剂(如芳烃油)改善相容性。傅里叶变换红外光谱(FTIR)技术则定量分析旧沥青中的羰基($C=O$)和亚砷基($S=O$)含量,这两个指标与沥青老化程度呈正相关,某再生混合料的 FTIR 检测显示,当旧料掺量为 30% 时,新沥青需具备 ≥ 60 (0.1mm) 的针入度和 $\geq 52^\circ\text{C}$ 的软化点,以补偿旧沥青的性能衰减。配合比设计阶段,旋转压实仪(SGC)通过模拟现场压实功,建立压实次数与空隙率的关系曲线,当旧料掺量增加时,需将压实次数从 75 次调整为 100 次以达到目标空隙率(4%)。结合车辙试验、低温弯曲试验数据,采用多元回归分析构建数学模型:

$$Y=0.82X_1+0.65X_2-0.37X_3+12.5$$

其中, Y 为再生混合料动稳定度(次/mm), X_1 为新沥青 60℃ 动力粘度($\text{Pa}\cdot\text{s}$), X_2 为旧料掺配比例(%), X_3 为再生剂掺量(%). 该模型在山东某再生路面工程中得到验证,预测值与实测值的误差控制在 $\pm 8\%$ 以内,指导施工单位将旧料利用率提升至 55%,同时满足 JTGF40-2020《公路沥青路面施工技术规范》要求。

3 沥青混合料试验检测技术的优化应用案例

3.1 某高速公路项目中的应用实践

在京港澳高速河北段改扩建工程中,针对重载交通频繁、四季温差大($-20^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$)的复杂工况,项目团队系统应用智能化检测设备与新型材料检测技术,构建了全流程质量管控体系。在沥青混合料拌合环节,引入基于物联网的实时监测系统,在 3 台间歇式拌合机的沥青加热罐、集料烘干筒和搅拌锅分别安装 12 组耐高温传感器,实时采集温度、搅拌时间等数据,通过 5G 网络传输至项目管理平台。当检

测到某批次集料烘干温度波动超过 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 时, 系统自动触发拌合参数自适应调整程序, 将沥青与集料的拌合时间从 45 秒延长至 60 秒, 确保混合料均匀性达标。

图像识别技术在路面缺陷检测中发挥关键作用。每日施工结束后, 搭载红外热成像仪的无人机对新摊铺路面进行巡航, 飞行高度 1.5 米, 扫描速度 5km/h, 可在 30 分钟内完成 10 公里路面检测。检测过程中, 系统自动识别出因混合料离析导致的低温区域 (温差 $\geq 3^{\circ}\text{C}$), 并通过 AI 算法判断离析类型 (粗集料或细集料离析)。针对 K23+800 处发现的粗集料离析带, 项目团队结合摊铺机螺旋布料器转速数据, 调整布料速度从 28r/min 至 32r/min, 后续检测显示离析率从 18% 降至 5%。

在材料性能检测方面, 针对本项目使用的高模量温拌沥青 (温拌剂掺量 1.0%), 采用动态剪切流变仪 (DSR) 进行多温度点 (46°C 、 52°C 、 58°C) 粘弹性测试, 建立温拌剂掺量与抗车辙因子 ($G^*/\sin \delta$) 的关联曲线, 确保高温性能满足重载交通要求。再生沥青混合料 (旧料掺量 40%) 的质量控制中, 通过荧光显微镜观察新旧沥青相容性, 发现当再生剂掺量低于 1.5% 时存在明显相分离, 据此调整再生剂用量至 2.0%, 结合旋转压实仪 (SGC) 确定最佳压实功 (100 次), 使再生混合料的空隙率稳定在 $4.2\% \pm 0.5\%$ 。

3.2 优化应用的效果评估

京港澳高速项目的技术优化应用取得显著成效, 核心指标对比传统检测方法实现全面提升。在检测效率方面, 物联网实时监测系统将拌合环节质量判定时间从 45 分钟缩短至 5 分钟, 摊铺密度检测从人工抽样 (每 200 米 1 点) 转变为全断面连续监测, 检测覆盖率提升至 100%。图像识别技术使路面缺陷检测效率提升 8 倍, 单公里检测时间从 2 小时压缩至 15 分钟, 且缺陷识别准确率从人工检测的 70% 提升

至 92%, 尤其是 0.5mm 以下微裂缝的发现率提高 60%。

施工质量控制效果显著, 沥青混合料压实度合格率从 91% 提升至 97%, 动稳定度实测值达到 8500 次/mm (传统工艺约 6000 次/mm), 满足重载交通 ≥ 8000 次/mm 的要求。低温弯曲试验显示, 优化后的混合料破坏应变达到 $2800\mu\epsilon$ (规范要求 $\geq 2500\mu\epsilon$), 抗开裂能力提升 12%。水稳定性方面, 冻融劈裂强度比从 82% 提高至 88%, 有效减少雨季路面坑槽病害。

经济效益与环保效益同步凸显。智能化检测设备的应用减少了 50% 的人工检测成本, 避免了因质量问题导致的返工损失约 320 万元。再生沥青混合料技术使旧料利用率达到 40%, 节约新沥青用量 1200 吨, 减少碳排放 1500 吨。温拌沥青技术降低拌合温度 30°C , 单台拌合机每日节约燃油消耗 15%, 整个项目周期节省能源成本约 80 万元。

4 结语

沥青混合料的试验检测技术是确保公路工程质量的关键环节。通过引入先进的检测设备和技术、改进试验检测方法以及加强质量控制与管理, 可以有效提高沥青混合料的质量, 延长公路使用寿命。未来, 应进一步推广应用优化后的试验检测技术, 加强技术创新和质量监控, 为公路工程建设提供更加科学、高效的技术支持, 推动公路工程行业的高质量发展。

参考文献:

- [1] 李增. 公路工程沥青混合料面层施工技术要点 [J]. 汽车周刊, 2025, (05): 119-121.
- [2] 梁治文. 公路路面施工中沥青混合料摊铺的施工技术浅析 [J]. 产品可靠性报告, 2025, (02): 128-129.
- [3] 林峰. 高速公路工程中沥青混合料的试验检测分析 [J]. 中国高新科技, 2025, (04): 125-127.