

# 高速公路沥青路面预防性养护关键技术

李林<sup>1</sup> 吕涛<sup>2</sup>

1. 山东高速交通建设集团有限公司 山东 济南 250000

2. 山东省高速养护集团有限公司 山东 济南 250000

**摘要:** 高速公路沥青路面预防性养护技术涵盖表面封层、裂缝修复、薄层罩面及再生技术等,通过防水抗渗、抗滑耐磨、延缓老化及结构补强等作用机理提升路面性能。其决策需考虑路面状况、交通量及气候条件,借助多指标综合决策模型与智能化系统实现精准养护。关键技术如微表处、就地热再生及裂缝填封等,在工程实践中成效显著。未来,预防性养护将向预测性、绿色化及全产业链协同方向发展。

**关键词:** 高速公路; 沥青路面; 预防性; 养护技术

**引言:** 随着我国高速公路网日益完善,车流量与重载比例持续攀升,沥青路面在长期服役过程中易出现裂缝、车辙、抗滑衰减等早期病害,影响行车安全与路网运营效率。传统“重建设轻养护”模式已难以满足现代交通需求,预防性养护作为主动维护策略,通过提前干预延缓病害发展、延长路面寿命,成为保障高速公路高质量运行的关键。本文系统梳理预防性养护技术体系、决策方法及典型案例,探讨其挑战与发展方向,为行业提供技术参考与实践指引。

## 1 高速公路沥青路面预防性养护技术体系与原理

### 1.1 技术分类与定义

(1) 表面封层技术: 通过在路面表层铺设薄层材料实现防护,主要包括稀浆封层、微表处、碎石封层、含砂雾封层四类,核心作用是封闭路面孔隙、延缓病害发展。(2) 裂缝修复技术: 针对路面不同类型裂缝的专项处置技术,分为灌缝(热灌/压力式)、开槽灌缝、抗裂贴铺设等,旨在阻止雨水渗入裂缝加剧结构损坏。(3) 薄层罩面技术: 在原有路面铺设薄层沥青混合料的养护技术,涵盖热拌沥青罩面、冷拌橡胶沥青罩面、超薄磨耗层(如NovaChip)等,兼具防护与提升路面性能的功能。(4) 再生技术: 对老化沥青路面材料进行修复再利用的技术,包括就地热再生、厂拌热再生及URA普适沥青增强再生,可实现资源循环并恢复路面性能。

### 1.2 技术作用机理

(1) 防水抗渗: 各类封层、罩面及裂缝修复材料能填充路面孔隙与裂缝,形成连续的防水屏障,阻止雨水、冰雪融水侵入路面基层,避免基层软化、脱空等病害。(2) 抗滑耐磨: 微表处、超薄磨耗层等技术采用高粗糙度骨料,可增加路面表层摩擦系数,提升雨天行车抗滑性能,降低交通事故风险。(3) 延缓老化: 再生技术通过掺入

再生剂,修复老化沥青的分子结构,恢复其黏结性与柔韧性,延缓沥青混合料的老化进程;封层技术则隔绝氧气、紫外线,减少沥青氧化老化。(4) 结构补强: 薄层罩面与再生技术可填补路面微小破损,分散车辆荷载产生的应力,抑制车辙、沉陷等结构性病害的发展,延长路面使用寿命<sup>[1]</sup>。

### 1.3 技术适用性分析

(1) 路面状况指数(PCI)、构造深度(TD)、车辙深度(RD)等指标与技术的匹配关系: PCI较高(路面破损轻微)、TD不足时,优先选用微表处、含砂雾封层; RD较小( $\leq 5\text{mm}$ )时可采用超薄磨耗层; PCI中等、存在多处裂缝时,适配裂缝修复+表面封层组合技术;路面严重老化但结构完整时,再生技术更为适用。(2) 交通量、气候条件对技术选择的影响: 高交通量路段优先选用微表处、NovaChip等快速开放交通的技术; 高温地区需选择抗车辙性能优的热拌沥青罩面; 多雨地区重点选用防水性强的封层技术及高抗滑薄层罩面; 寒冷地区宜采用柔韧性好的橡胶沥青类冷拌罩面技术,避免低温开裂。

## 2 高速公路沥青路面预防性养护时机决策模型

### 2.1 传统决策方法局限性

(1) 时间间隔法: 该方法以固定时间周期作为养护决策依据,未充分考虑不同路段的交通荷载、气候条件差异对路面实际衰变规律的影响。部分低交通量、气候温和路段可能因过早养护造成资源浪费,出现“过度养护”; 而高交通量、恶劣气候路段则可能因养护不及时导致病害加剧,形成“养护不足”,两种情况均会降低养护资金使用效益。(2) 单一指标法(如仅用PCI): 路面状况指数(PCI)仅能反映路面破损程度的整体情况,采用单一指标决策时,会忽略裂缝、车辙、抗滑不足等不同病害之间的协同作用。例如,部分路段PCI指标达标,但

存在大量细微裂缝,若未及时养护,雨水易渗入引发基层损坏,单一指标决策易导致养护时机误判,无法实现精准养护。

## 2.2 多指标综合决策模型

(1) 触发值法:构建以PCI、RQI(行驶质量指数)、SRI(抗滑性能指数)为核心,兼顾车辙深度(RD)、构造深度(TD)等辅助指标的综合评价体系,通过大量试验数据与工程实践设定各指标合理阈值。当任意核心指标低于阈值或辅助指标出现异常突变时,自动触发预防性养护流程,实现基于路面实际性能的精准决策,有效规避传统方法的片面性。(2) 生命周期成本分析(LCCA):从全寿命周期视角出发,全面核算不同养护方案的初始施工成本、后期运营维护成本、病害处置成本及交通延误损失等。通过对比分析各方案的总费用现值,筛选出成本最优且能保障路面性能的养护策略,为养护资金的合理分配提供科学依据,提升养护投资回报率<sup>[2]</sup>。(3) 机器学习模型:依托海量历史养护数据,包括路面性能指标、交通量、气候参数、养护措施及效果等,训练BP神经网络、随机森林等机器学习模型。模型可挖掘各影响因素与路面性能衰变的内在关联,精准预测未来一定周期内的路面性能变化趋势,为养护时机的提前预判和方案优化提供数据支撑,提升决策的前瞻性与科学性。

## 2.3 智能化决策系统构建

(1) 数据采集层:构建多源异构数据采集网络,集成探地雷达、激光纹理仪、北斗定位等先进设备。其中,探地雷达可实现路面内部裂缝、脱空等病害的无损检测;激光纹理仪精准测量路面构造深度,保障抗滑性能数据准确性;北斗定位系统实时追踪养护施工机械位置,监测施工轨迹与摊铺精度,确保数据采集的全面性、精准性与实时性。(2) 分析层:深度集成路面管理系统(PMS)与建筑信息模型(BIM)技术,将采集的路面数据与BIM三维模型关联融合,实现病害位置、类型、程度的可视化呈现。同时,利用PMS的数据分析功能与BIM的模拟仿真能力,对不同养护方案的实施效果进行预演,对比方案可行性与优劣性,为决策提供直观支撑<sup>[3]</sup>。(3) 应用层:开发移动端APP与后台管理平台,实现养护业务全流程智能化管控。通过APP向养护单位精准推送养护任务清单,包含病害位置、处置方案、时间要求等信息;养护人员可通过APP实时上传施工过程数据与现场照片,后台平台实时监控施工进度与质量,及时发现并解决施工问题,保障养护工作高效规范开展。

## 3 高速公路沥青路面预防性养护关键技术应用与案例分析

### 3.1 微表处技术

(1) 技术特点:作为表面封层类核心技术,微表处以聚合物改性乳化沥青为胶结料,搭配级配骨料、填料及水混合摊铺,具备显著的技术优势。施工完成后2-4小时即可开放交通,大幅降低对路网通行的影响,适配高流量路段养护需求;通过选用高耐磨、高粗糙度骨料,可使路面抗滑性能提升30%-50%,有效改善雨天行车安全性;其整体密封性能优良,能有效阻隔雨水侵入,延长路面使用寿命至5-8年,且施工成本相对较低,性价比突出。(2) 案例:在G312国道镇江段预防性养护工程中,该路段因长期承受重载交通,出现轻微车辙(深度2-3mm)及抗滑性能衰减(构造深度低于0.5mm)等问题,最终选用微表处技术进行处置。施工过程中针对不同车道交通量差异,采用分幅施工模式,最大限度减少交通拥堵。工程完工后,路面抗滑性能达标率100%,轻微车辙完全消除,经后期跟踪监测,相较于传统铣刨重铺方案,直接节约养护费用40%,且路面使用性能稳定,未出现明显病害复发情况。

### 3.2 就地热再生技术

(1) 技术特点:该技术通过专用设备对旧沥青路面进行就地加热、翻松,掺入再生剂、新沥青及新骨料后重新摊铺压实,核心优势显著。可实现旧路面材料100%回收再利用,大幅降低资源消耗;施工效率高,推进速度可达3-5米/分钟,单幅施工周期短,对交通干扰小;相较于传统养护技术,碳排放减少60%以上,契合绿色养护发展理念。其中,URA普适沥青增强再生技术在旧料适配性上更具优势,可提升再生混合料性能稳定性<sup>[4]</sup>。(2) 案例:在S340省道养护工程中,针对路段沥青路面老化严重、表层松散等问题,采用URA就地热再生技术进行处置。施工前通过对旧路面材料性能精准检测,科学配比再生剂与新骨料掺量,有效提升了再生混合料的黏结性与强度。工程实施后,旧料利用率从传统热再生技术的60%左右提升至75%,大幅减少了新料开采与旧料丢弃量;经核算,整个工程相较于传统铣刨重铺方案,减少碳排放200吨,同时施工成本降低35%,路面承载能力与平整度均达到规范要求,实现了经济效益与生态效益的双重提升。

### 3.3 裂缝填封技术

(1) 技术对比:作为处置路面裂缝的核心技术,压力式灌缝机灌缝与抗裂贴铺设各有优劣,适配不同场景需求。压力式灌缝机灌缝通过高压将热沥青密封胶注入裂缝内部,胶结料与裂缝壁贴合紧密,密封性优,能有效阻止雨水渗透,但其施工流程相对复杂,需先对裂缝

开槽、清理、烘干,适配裂缝宽度 $\geq 3\text{mm}$ 的中宽缝;抗裂贴则采用自粘式高分子材料,施工便捷,无需复杂预处理,直接粘贴即可完成施工,效率高,适配裂缝宽度 $< 3\text{mm}$ 的细缝,但长期使用后可能出现粘贴不牢、密封性能下降等问题。(2)案例:某高速公路运营多年后,路面出现大量细缝及部分中宽缝,若不及时处置易引发坑槽、基层损坏等连锁病害。工程团队采用“分类处置”策略,对细缝选用抗裂贴铺设,中宽缝采用压力式灌缝机灌缝。养护完成后经两年跟踪监测,该路段坑槽发生率较养护前降低70%,路面结构稳定性显著提升,原本计划3年的中修周期延长至6年,大幅降低了后续养护成本,验证了裂缝填封技术在延缓路面病害发展中的关键作用。

#### 4 高速公路沥青路面预防性养护的挑战与未来发展方向

##### 4.1 现存挑战

(1) 养护资金分配不均:长期以来“重建设轻养护”的发展理念占据主导,各地在高速公路建设阶段投入大量资金,而对运营期预防性养护的资金保障不足。资金多向已出现严重病害的路段倾斜,用于预防性养护的资金占比偏低,导致轻微病害无法及时处置,逐步发展为结构性损坏,反而增加后期大修成本,形成“恶性循环”。(2) 技术标准不统一:当前沥青路面预防性养护领域,行业标准与地方规范存在诸多差异,部分技术指标、施工工艺要求不统一。例如,不同地区对微表处材料的级配要求、施工温度标准各不相同,导致技术推广受阻,跨区域养护工程难以形成标准化施工流程,影响养护质量的稳定性。(3) 智能化水平不足:现有数据采集设备精度参差不齐,部分基层养护单位仍依赖传统人工检测手段,效率低且误差大;已应用的智能化决策模型多基于特定区域、特定路况数据训练,泛化能力弱,难以适配不同气候、不同交通量的路段,导致决策建议的针对性和准确性不足,无法充分发挥智能化技术的赋能作用。

##### 4.2 未来趋势

(1) 预测性养护:依托物联网、大数据与人工智能技术深度融合,构建全域感知的路面监测网络。通过在

路面布设传感器、结合无人机巡检等方式,实时采集路面性能数据;利用AI算法挖掘数据关联规律,精准预测病害发展趋势,实现病害早期预警,提前制定针对性养护方案,推动养护模式从“被动处置”向“主动预防”转变,提升养护精准度与有效性。(2) 绿色养护:践行“双碳”战略,大力推广绿色环保养护技术与材料。研发应用生物基再生剂、废旧橡胶改性沥青等环保材料,降低对不可再生资源的依赖;采用太阳能加热、电加热等清洁能源设备替代传统燃油设备,减少施工过程中的碳排放;优化再生工艺,提高旧路面材料回收利用率,实现资源循环利用,构建生态友好型养护体系。(3) 全产业链协同:打破“设计-施工-养护”各环节割裂的现状,构建一体化协同模式。在道路设计阶段提前考量后期养护需求,选用易养护、耐久性强的材料与结构;施工阶段严格把控工程质量,为后期预防性养护奠定基础;养护阶段及时反馈路面性能数据,反向优化设计与施工方案,形成全生命周期闭环管理,提升路网整体使用寿命与运营效益。

##### 结束语

高速公路沥青路面预防性养护技术是保障道路性能、控制养护成本的关键手段。通过精准评估路面状况、合理选择封层、再生等预防性技术,可有效延缓病害发展,提升路面耐久性与行车安全性。未来,随着物联网、大数据等技术的融合应用,预防性养护将向智能化、精准化方向迈进,进一步优化资源配置,推动高速公路养护向全生命周期管理转型,助力交通基础设施高质量发展。

##### 参考文献

- [1]王亮.高速公路沥青路面预防性养护管理[J].工程建设与设计,2025,(17):249-251.
- [2]曾全,金钊.微表处技术在高速公路沥青路面养护施工中的应用研究[J].科技资讯,2025,23(16):151-153.
- [3]赵磊.超薄罩面技术在高速公路沥青路面养护中的应用[J].交通世界,2025,(19):143-145.
- [4]刘生源.高速公路沥青路面预防性养护技术的应用[J].运输经理世界,2025,(17):136-139.