

高速公路沥青路面预防性养护技术

马 奔 郑勇成

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旨在通过早期干预延缓病害发展，延长路面寿命。其核心在于采用封层、稀浆封层、微表处、薄层罩面及裂缝修补等技术，针对不同病害类型与严重程度，在路面结构未受损时实施预防性处理。此类技术可有效封闭裂缝、增强抗滑性能、防止水损害，并恢复路面平整度，显著降低全寿命周期养护成本，提升行车安全性与舒适性。

关键词：高速公路；沥青路面；预防性；养护技术

引言：随着我国高速公路建设规模持续扩大，沥青路面在重载交通、温度交替及雨水侵蚀等作用下，早期病害问题愈发突出，传统“坏了再修”的养护模式已难以满足高效运营需求。预防性养护作为主动式养护策略，通过在路面性能衰减初期实施科学干预，可显著延缓病害发展、降低大修频率，实现全寿命周期成本优化。本文聚焦高速公路沥青路面，系统探讨预防性养护技术体系及决策方法，助力行业养护水平提升。

1 高速公路沥青路面病害类型与成因分析

1.1 常见病害类型

(1) 裂缝类病害：是沥青路面最普遍的病害形式，主要包括横向裂缝、纵向裂缝和网裂。横向裂缝多由温度变化引发，低温时沥青混合料收缩产生拉应力，超过材料抗拉强度后开裂，裂缝走向与路面轴线垂直；纵向裂缝多因路基沉降不均、车道荷载分布差异导致，平行于路面行车方向；网裂则是路面结构整体强度不足的表现，多由多种因素叠加引发，裂缝交错形成网状。(2) 变形类病害：核心是路面结构无法承受荷载或环境作用产生的永久变形，主要有车辙、拥包和沉陷。车辙多出现于行车道，由重载车辆反复碾压导致沥青混合料流动变形累积形成；拥包多在交叉口等制动频繁区域，因沥青混合料热稳定性不足，受水平推力作用隆起；沉陷则与路基压实不足、不均匀沉降相关，导致路面局部下沉。(3) 表面功能衰减类病害：直接影响行车安全性，主要表现为抗滑性能下降和渗水系数超标。抗滑性能下降是因路面集料磨损、沥青老化泛油，表面粗糙度降低；渗水系数超标多由路面压实不足、裂缝发育导致，雨水易渗入内部，加剧结构损坏^[1]。

1.2 病害成因机理

(1) 交通荷载作用：重载、超载车辆是病害产生的核心诱因。此类车辆产生的荷载远超设计标准，会加速

沥青混合料疲劳损伤，导致路面结构层过早破坏，同时反复碾压会引发变形累积，诱发车辙、裂缝等病害。

(2) 环境因素：温度变化引发沥青混合料热胀冷缩，反复循环易产生裂缝；紫外线照射会加速沥青老化，降低材料柔韧性和黏结力；雨水侵蚀则会软化路基、冲刷混合料，加剧结构破坏，诱发沉陷、渗水等问题。(3) 材料与施工缺陷：材料层面，沥青老化、集料级配不合理会降低路面整体性能；施工层面，集料离析导致局部强度不足，压实不足则使路面孔隙率过大，易渗水且承载能力下降，为病害产生埋下隐患。

2 高速公路沥青路面预防性养护技术

2.1 按技术原理分类

(1) 封层类技术：核心作用是封闭路面孔隙、阻断水渗透，同时提升路面抗滑性能，延长使用寿命。其中，碎石封层通过将热沥青与单粒径碎石同步撒布碾压成型，适用于路面轻微裂缝、抗滑不足的场景，兼具防水与耐磨功能；稀浆封层采用乳化沥青、集料、填料等混合成稀浆状摊铺，可快速修复路面轻微破损，施工便捷且成本较低；微表处是稀浆封层的升级技术，通过优化材料级配和添加剂，具备更强的耐磨、抗滑及抗车辙能力，适用于中重型交通路段的预防性养护。(2) 薄层罩面类技术：以薄层摊铺方式恢复路面平整度和使用功能，对原路面结构扰动小。薄层沥青混凝土(SAC-10)采用细粒式级配，具有良好的密水性和抗滑性，适用于路面轻度不平整、表面功能衰减的修复；超薄磨耗层(UTFC)摊铺厚度仅2-3cm，采用高黏沥青和优质集料，具备超强耐磨、抗滑性能，且施工后开放交通快，适合重载交通繁忙路段的快速养护。(3) 裂缝修补类技术：针对性解决路面裂缝病害，防止雨水渗入加剧结构损坏。灌缝技术通过灌注专用密封胶填充裂缝，阻断水分渗透，适用于宽度0.5-5mm的裂缝；贴缝带采用高分子

复合材料制成,直接粘贴于裂缝表面,施工快速、密封性好,适用于中小型裂缝的应急修复;抗裂贴兼具密封和抗裂功能,可承受路面伸缩变形,适用于裂缝发育较多区域,能有效延缓裂缝扩展^[2]。(4)再生类技术:通过对老化沥青混合料进行再生利用,恢复其路用性能,兼具环保与经济性。就地热再生利用专用设备加热软化原路面,添加再生剂和新集料搅拌后重新摊铺,适用于路面表层老化、轻微裂缝的养护,无需开挖废料;厂拌热再生将回收旧料运至厂内破碎筛分,与新料、再生剂混合拌制后重新铺筑,质量可控性强,适用于大面积路面性能衰减修复;冷再生无需加热,通过添加乳化沥青、水泥等稳定剂与旧料混合再生,施工能耗低,适用于路基和基层的预防性强化。

2.2 按实施时机分类

(1)早期轻微病害修复($PCI \geq 80$):此阶段路面整体性能良好,仅存在轻微裂缝、抗滑不足等表层问题。养护核心是“早干预、小投入”,优先采用封层、贴缝带等低成本、快施工技术,及时阻断病害发展,维持路面最佳使用状态,避免病害进一步恶化增加后续养护成本。(2)中期性能衰减干预($PCI 60-80$):路面出现明显的表面功能衰减,伴随中度裂缝、轻度车辙等病害,结构强度尚未大幅下降。养护需兼顾功能恢复与结构强化,可选用微表处、薄层罩面等技术,恢复路面平整度和抗滑性,同时提升路面承载能力,延缓性能进一步衰退。(3)临界状态维护($PCI 40-60$):路面病害已较为严重,存在大面积裂缝、明显沉陷或车辙,结构稳定性受影响但尚未完全破坏。养护需采用针对性强的强化技术,如就地热再生、超薄磨耗层等,必要时结合局部结构修补,快速恢复路面使用功能,避免进入大修阶段,降低养护总成本。

2.3 技术适用性对比

(1)不同气候区适配:寒冷地区需优先选择抗裂性能优异的技术,如抗裂贴、就地热再生(添加抗裂剂),可有效抵御温度骤变引发的裂缝;多雨地区重点保障防水功能,推荐采用微表处、稀浆封层等密水性好的技术,同时搭配灌缝技术封堵裂缝,防止雨水渗入软化路基;高温地区需侧重抗车辙性能,超薄磨耗层、SAC-10薄层沥青混凝土因耐高温、抗变形能力强,成为优选方案。(2)不同交通量适配:重载路段需选用高强度、高耐磨技术,如微表处、超薄磨耗层、碎石封层,可承受重载车辆反复碾压,延长养护周期;轻载路段交通荷载较小,养护重点在于防水和表面功能维持,可选用稀浆封层、贴缝带等低成本技术,在保障养护效果的

同时控制成本;对于交通繁忙路段,优先选择施工速度快、开放交通早的技术,如微表处、超薄磨耗层,减少对交通通行的影响^[3]。

3 高速公路沥青路面预防性养护技术选择与决策方法

3.1 决策依据与评价指标

(1)核心性能评价指标:路面性能指数(PCI)、国际粗糙度指数(IRI)、抗滑值(BPN)是判断路面状态的核心依据,直接决定养护需求与技术方向。其中,PCI综合反映路面破损程度,通过评估裂缝、车辙、沉陷等病害的类型、面积及严重程度量化得分,明确病害治理优先级;IRI表征路面平整度,直接影响行车舒适性与安全性,超标时需优先采用薄层罩面、微表处等平整度恢复技术;BPN衡量路面抗滑能力,针对雨天行车安全关键,不足时需选用碎石封层、微表处等提升抗滑性能的技术。三者协同分析,可全面掌握路面实际状况,为技术选型提供基础数据支撑。(2)全寿命周期成本分析(LCCA):作为经济性决策的核心依据,需综合核算养护方案从实施到下一次养护的全周期成本,包括初始施工成本、后期运维成本、交通延误损失等。通过对比不同技术方案的LCCA结果,优选成本效益比最优的方案。例如,虽然超薄磨耗层初始施工成本高于稀浆封层,但因其使用寿命更长、后期运维成本更低,在重载交通路段的全寿命周期成本可能更具优势,通过LCCA可精准判断其经济性适配性^[4]。

3.2 决策模型构建

(1)基于层次分析法(AHP)的多目标决策模型:针对养护决策中性能提升、成本控制、施工效率等多目标平衡问题,通过AHP构建层级结构。上层为总目标(最优养护方案),中层为评价准则(如技术适配性、经济性、环境影响等),下层为备选技术方案。通过两两对比确定各准则权重,结合指标量化数据计算各方案综合得分,实现多维度下的科学选型。该模型可有效规避主观决策偏差,尤其适用于多病害叠加、技术方案可选范围广泛的复杂场景。(2)基于机器学习的病害预测与养护时机优化:依托大数据技术,整合历史路面检测数据、交通荷载数据、环境数据等,通过神经网络、随机森林等机器学习算法构建病害发展预测模型。可精准预测未来一定周期内路面性能衰减趋势,明确最佳养护时机,避免过早养护造成成本浪费或过晚养护导致病害恶化。同时,结合实时检测数据动态修正模型,提升决策的时效性与准确性,为预防性养护的“精准干预”提供技术支撑。

3.3 典型决策流程

(1) 数据采集:采用激光平整度仪、落锤式弯沉仪等专业检测设备,开展路面全面检测。激光平整度仪可快速精准获取IRI数据,反映路面平整度状况;落锤式弯沉仪通过检测路面弯沉值,评估路面结构承载能力;同时结合人工调查补充病害类型、分布等数据,形成涵盖性能指标、病害状况的完整数据集,为后续决策提供可靠数据基础。(2) 病害诊断与分级:基于采集的数据,对照相关技术标准对路面病害进行分类与严重程度分级,结合PCI、IRI、BPN等指标判定路面性能等级。例如,将裂缝分为轻微、中度、重度三级,结合PCI得分明确路面处于早期轻微病害、中期性能衰减或临界状态,精准定位养护需求,为技术方案匹配提供方向^[5]。(3) 技术方案比选与经济性评估:根据病害诊断结果,筛选适配的养护技术形成备选方案。从技术适配性(如气候区、交通量适配)、施工可行性(如施工周期、交通影响)等方面进行定性比选,再通过LCCA开展经济性量化评估,综合确定最优养护方案。最终形成“检测-诊断-比选-评估”的闭环决策流程,保障养护技术选择的科学性与经济性。

4 高速公路沥青路面预防性养护的挑战与应对策略

4.1 技术挑战

(1) 早期病害识别精度不足:早期病害多表现为微小裂缝、表层轻微松散等隐性问题,传统人工检测易漏判、误判,常规检测设备对微小病害的识别灵敏度有限。这导致预防性养护难以精准“早介入”,错过最佳养护时机,使轻微病害逐步发展为严重破损,增加养护成本。(2) 复合病害针对性技术缺乏:实际工程中,路面常出现裂缝+车辙、沉陷+渗水等复合病害,不同病害相互影响加剧结构损坏。但现有养护技术多针对单一病害设计,缺乏兼顾多种病害的一体化解决方案,导致养护效果不佳、重复养护问题突出。

4.2 管理挑战

(1) 养护资金分配不合理:资金分配多依赖经验判断,未结合路面实际性能等级、病害发展趋势科学规划,存在重载繁忙路段资金投入不足、轻微病害路段过度养护等问题,导致资金使用效率低下,难以实现全路网养护效益最大化。(2) 养护标准与验收规范滞后:随

着新型养护技术、材料的推广应用,现有养护标准和验收规范难以适配新需求,对微表处、就地热再生等技术的施工参数、质量评定指标界定不清晰,导致施工质量管控缺乏依据,影响养护工程质量。

4.3 应对策略

(1) 推广智能化检测设备:普及三维探地雷达、无人机巡检等先进设备,结合大数据分析技术,实现对早期微小病害的精准识别与定位,提升检测效率和精度,为早干预提供技术支撑。(2) 建立动态养护数据库与决策支持系统:整合路面检测数据、交通荷载数据、养护历史数据等,构建动态数据库,结合决策模型实现养护需求精准研判和资金科学分配,提升管理精细化水平。

(3) 加强新材料研发:重点研发高弹性改性沥青、自愈合材料等新型材料,提升路面抗裂、抗车辙及自我修复能力,同时配套研发复合病害一体化养护技术,增强养护针对性和耐久性。

结束语

高速公路沥青路面预防性养护是保障路网服务品质、控制全寿命周期成本的关键举措。通过科学识别病害早期特征,精准匹配封层、薄层罩面、再生等预防性技术,可有效延缓路面性能衰减,避免结构性破坏。未来需进一步融合智能检测、大数据分析及新材料研发成果,构建动态化、精准化的养护决策体系,推动预防性养护向智能化、绿色化方向升级,为高速公路高质量发展提供坚实支撑。

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]宋迪.高速公路沥青路面养护施工微表处技术的应用[J].工程建设与设计,2025,(13):210-212.
- [4]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.
- [5]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.