

沥青公路预防性养护技术选择与效益对比分析

香艳艳

新疆北新路桥集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要:为解决沥青公路养护选型盲目、效益偏低等问题,本文依托预防性养护核心理论,剖析表面封层、薄层罩面、再生类主流技术的适用条件与优劣特性,构建多维度技术选型与效益评价体系。结合公路等级、交通荷载及气候场景开展差异化选型分析,量化对比各类技术的经济、技术与社会效益,梳理当前养护应用短板,提出精准选型、规范施工、全周期优化的完善策略,为沥青公路科学化预防性养护提供参考。

关键词: 沥青公路; 预防性养护; 技术选择; 效益对比

引言: 沥青路面长期受荷载、气候及环境因素影响,易出现裂缝、车辙、渗水等病害,传统被动修复养护模式成本高、路面服役效益差。预防性养护秉持“预防为主”理念,可在路面性能最优窗口期干预病害,有效延长道路使用寿命。为实现养护资源高效利用,本文系统研究各类预防性养护技术的适配工况,搭建科学选型体系,对比多场景综合效益,针对性优化养护方案,助力公路养护提质降本、绿色高效发展。

1 沥青公路预防性养护核心技术与适用条件分析

1.1 预防性养护核心理论基础

(1) 预防性养护的定义与核心特征: 预防性养护是在路面尚处良好状态时,主动采取的、旨在延缓病害发生与发展的系统性养护措施。其核心优势在于将养护时机大幅提前,以较低成本维持路面长期性能,充分体现“预防为主、防治结合”的主动养护理念,区别于事后修复的矫正性养护。(2) 预防性养护最佳窗口期: 宜以路面性能指数(PQI)为主要判定依据,当PQI处于80~90区间且路面主要病害(裂缝率、车辙深度等)未达临界值时,即为最佳干预窗口。同时需综合考量路面使用年限及性能衰减速率,确保在性能快速下降前完成养护。(3) 技术选型核心原则: 应遵循安全性、经济性、适配性、环保性四大准则。安全性涵盖施工过程与行车安全;经济性强调全寿命周期成本最优;适配性要求技术方案与路况、气候、荷载匹配;环保性关注节能降耗与排放控制。

1.2 主流预防性养护技术工艺解析

(1) 表面封层类技术: 雾封层采用乳化沥青喷洒,封闭表面微小裂缝,适用于轻度老化与渗水病害;稀浆封层将矿料与乳化沥青拌和摊铺,适用于填充裂缝、修

复轻度车辙;微表处采用改性乳化沥青与级配集料,快速成型、抗滑耐磨,适用于中等程度车辙与表面功能恢复。(2) 薄层罩面类技术: 超薄磨耗层采用专用摊铺设备铺设1.5~2.5cm厚改性沥青混合料,具有优异的抗滑、降噪及抗裂性能;温拌薄层罩面通过添加剂降低拌和温度,具有节能环保优势,适用于城市道路及对交通影响敏感路段^[1]。(3) 再生类预防性养护技术: 就地冷再生适用于旧路基层强度尚可、面层损坏严重路段,可全厚度再生利用;薄层热再生多用于表面功能退化路段,可恢复抗滑性与平整度。

1.3 各类养护技术适用工况与优缺点对比

(1) 路况适配性: 微表处对轻中度车辙($\leq 25\text{mm}$)及表面渗水治理效果显著,而对贯穿性裂缝治理能力有限;稀浆封层适用于裂缝密集但尚未沉陷的路面;超薄罩面对各类裂缝、平整度问题均有改善,但对深层结构性病害无效。(2) 环境与交通适配性: 微表处施工速度快(1~2h开放交通),适宜重交通路段;温拌罩面排放低,适宜环保要求高区域;雾封层对高温多雨区易出现泛油问题,寒冷地区抗开裂性一般。(3) 技术短板总结: 表面封层类无法治理结构性病害,长期耐久性有限;薄层罩面造价相对较高,施工要求严格;再生类受旧料质量及环境温湿度制约显著。禁忌场景包括: 路基强度不足、严重龟裂网裂、深层结构性破坏及冻胀严重路段,以上场景应优先考虑结构性大修。

2 沥青公路预防性养护技术选型体系构建

2.1 技术选型影响因素分析

(1) 路面基础因素: 路面结构强度是技术选型的根本前提,需依据弯沉值、基层完整性等指标判定是否具备预防性养护条件;病害类型直接影响技术适配方向,

裂缝、车辙、松散、渗水等不同病害需对应不同处治原理；路面服役年限则反映材料老化程度与剩余寿命，服役后期应谨慎选用表面封层类技术。（2）外部环境因素：区域气候条件（温度变化幅度、降水量、日照强度）制约材料性能与施工窗口期，高温多雨区需侧重抗水损与抗车辙能力，寒冷区则需关注抗裂与抗冻融性能；水文条件影响路面排水需求及水损害风险，交通流量与荷载等级则直接决定养护层的强度与耐久性要求，重载交通路段须优先保障抗剪切与抗疲劳能力。（3）工程管控因素：养护工期限制施工工艺选择，短时开放交通需求下宜选用快凝型材料；施工成本直接受材料价格、设备投入及人工费用综合影响，需在预算范围内寻求最优方案；环保要求日益严格，低排放、低噪音技术更受政策青睐；交通保通需求在半幅施工、全封闭等不同模式间权衡，影响技术落地可行性。

2.2 多维度技术选型评价指标建立

（1）技术性能指标：病害治理效果以处治后特定病害改善率量化评价，一般要求关键病害处治率达80%以上；路面性能提升幅度通过PQI、抗滑系数、平整度等指标的提升值综合判定；技术耐久性以养护后路面服务寿命延长年限及性能衰减速率表征，是衡量养护成效的核心维度。（2）经济成本指标：初期施工成本涵盖材料费、设备费、人工费及交通组织费等一次性投入；后期运维成本指养护周期内的日常维护与管理费用；全生命周期投入需将初期投资与后期费用折现汇总，以年均养护成本或费用效益比进行横向比较，为决策提供经济依据。（3）社会环保指标：施工工期长短影响社会通行成本与路网运行效率；交通影响以封闭车道数、绕行距离及通行延误时长为量化依据；碳排放指标覆盖材料生产、拌和、运输及施工全过程的碳排放总量；噪音污染以施工时段等效声级及周边敏感点达标情况衡量，是环保考核的刚性约束^[2]。

2.3 差异化场景技术选型方案

（1）低等级轻交通公路：优先选用低成本、易施工技术。稀浆封层和雾封层因材料来源广泛、设备要求简单、造价低廉，成为主要选择，可在有限投资下有效延长路面使用寿命；对于轻度病害，也可采用手工涂刷类简易封层技术，以降低设备调运成本，充分体现经济适用原则。（2）高等级重交通公路：须选用高耐久、高性能技术方案。微表处因具备快速成型、抗滑耐磨、可修复车辙等优势，适合高速公路与干线公路；超薄磨耗层以其优异的抗裂、抗滑及降噪性能，适用于重交通荷载及对行车舒适性要求高的路段，尽管初期造价

较高，但全寿命周期效益显著。（3）特殊气候区域：多雨地区须选用抗水损能力强的改性稀浆封层或高粘沥青超薄罩面，并强化排水设计；高温地区应优先选用抗车辙性能优异的改性沥青微表处及温拌罩面，确保高温稳定性；高寒地区则需选用低温抗裂性能良好的弹性体改性沥青材料，配合薄层罩面技术，以应对冻融循环与低温收缩的叠加作用，同时应避开冬季严寒期施工。

3 沥青公路不同预防性养护技术效益对比分析与优化策略

3.1 养护效益评价体系构建

（1）经济效益指标：直接养护成本涵盖材料采购、设备租赁、人工费用及交通组织等一次性投入，是评估技术经济性的基础参数；路面寿命延长收益指预防性养护实施后路面服役年限的增量，通常按延长年限与年均养护费用的乘积折算货币价值；后期维修成本节约值体现为因及时干预而延迟或避免的结构性大修费用，将未来维修支出按合理折现率换算为当期等值，三者形成经济效益的完整评价链条。（2）技术效益指标：路面平整度改善以前后国际平整度指数（IRI）的变化率衡量，抗滑性以摆式摩擦系数或横向力系数的提升幅度表征，防水性则通过渗水系数降低率评价；病害复发率控制水平通过养护后固定观测节点（如6个月、1年、2年）关键病害复发比例的统计加以量化，该指标直接反映养护技术对病害根源的治理深度，是区分技术优劣的核心尺度^[3]。（3）社会效益指标：交通拥堵减少效益以养护施工期间及竣工后通行能力提升所减少的车辆延误时间折算为货币价值；行车舒适度提升结合驾乘人员主观评价与车辆振动加速度客观检测进行综合评估；道路通行安全性提升以前后事故率变化、能见度改善及紧急制动频次降低等数据予以量化，体现养护工程对社会公众出行品质的贡献。

3.2 主流养护技术多维度效益对比分析

（1）经济效益对比：微表处单位造价约25~40元/m²，全寿命周期年均成本约5~7元/（m²·年），投入产出比优良，适宜车辙路段；超薄磨耗层单位造价约50~80元/m²，但耐久年限长达6~8年，年均成本约6~10元/（m²·年），高等级公路全寿命效益显著；稀浆封层单位造价约15~25元/m²，年均成本约5~8元/（m²·年），低交通公路经济性最优；雾封层单位造价仅8~15元/m²，但有效寿命仅2~3年，年均成本约4~7元/（m²·年），适宜短期性能维持^[4]。（2）技术效益对比：微表处可修复≤25mm车辙，抗滑系数恢复至45BPN以上，耐久年限5~6年；超薄磨耗层对裂缝、平整度、抗滑性

均有全面改善, IRI 改善率可达 30% 以上, 耐久年限 6~8 年, 技术效益最为均衡; 稀浆封层封闭裂缝效果良好, 渗水系数可降低 80% 以上, 但对车辙修复能力有限; 就地冷再生病害治理彻底, 但受旧料质量与环境温度制约显著。(3) 综合效益排序: 高等级重交通场景下, 超薄磨耗层因技术全面性及耐久性优势排名首位, 微表处次之; 低等级轻交通场景下, 稀浆封层因经济性突出位列第一; 多雨高湿地区改性微表处与超薄罩面并列优先; 高寒地区温拌超薄罩面综合效益领先, 其低温抗裂性能与施工适应性优势明显。

3.3 养护技术应用现存问题

(1) 技术选型盲目化: 部分项目脱离实际路况与场景特征, 存在简单化的“一刀切”选型倾向, 如重载路段选用稀浆封层导致短期内损坏、多雨地区采用普通雾封层引发泛油及抗滑衰减等, 选型失误直接造成资源浪费与养护失败。(2) 施工管控不规范: 摊铺厚度不均、碾压温度偏离设计范围、材料配合比调整随意等工艺落实不到位现象突出, 加之部分项目监理与检测力量薄弱, 直接影响养护工程落地质量与耐久性表现。(3) 效益管控缺失: 当前管理普遍“重建轻养”, 养护后缺乏系统性能跟踪与数据积累机制, 未能建立基于长期性能反馈的方案优化闭环, 全寿命周期综合效益远未实现最大化, 制约了预防性养护的科学化发展。

3.4 预防性养护技术优化应用策略

(1) 精准选型策略: 构建“路况 + 环境 + 交通”三位一体精准选型决策机制, 以路面结构强度与病害类型为基础约束, 叠加区域气候、水文条件进行适配性筛选, 再结合交通荷载等级与施工窗口期综合决策, 制定分级分类技术推荐清单及决策流程图, 确保选型科学规范。(2) 施工质量优化: 制定各养护技术专项施工指南与质量验收标准, 明确材料关键指标、施工温度窗口、

摊铺厚度精度、碾压工艺参数等核心控制要素; 建立施工前原路面处治验收、施工中全过程质量监控、施工后综合检验的三级管控体系, 确保工艺要求逐项落实到位^[5]。(3) 全周期效益提升策略: 建立养护路段长期性能跟踪档案, 按年度检测 PQI 及裂缝率、车辙深度、抗滑系数等关键指标; 依据性能衰减数据及时实施局部补强或二次养护干预, 形成“检测-评估-养护-再评估”的闭环优化机制, 动态调整后续方案, 最大限度降低全寿命周期养护总成本, 实现预防性养护综合效益最大化。

结束语

本文系统梳理了沥青公路主流预防性养护技术的工艺特点与适用工况, 建立多维度选型与效益评价体系, 明确不同路况、交通及气候场景的最优养护方案, 总结了当前技术选型、施工管控与效益运维的现存问题。研究表明, 差异化精准选型、标准化施工管控、全周期闭环优化可最大化养护综合效益。后续可结合实际工程数据迭代优化选型体系, 推动沥青公路预防性养护技术规范、精细化发展。

参考文献

[1] 白志强. 沥青路面预防性养护理念与发展历程 [J]. 公路交通科技, 2022, 39(06): 89-95.

[2] 崔永祥. 全寿命周期成本在路面养护决策中的应用 [J]. 公路工程, 2023, 48(02): 102-108.

[3] 李海莲, 司金忠, 贾卫东, 等. 基于三级养护标准的沥青路面预养护方案多目标加权灰靶决策 [J]. 北京工业大学学报, 2024, 50(05): 591-599.

[4] 卢成涛. 高速公路沥青路面预防性养护措施效益对比研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2025, 31(06): 269-273.

[5] 郭树春. 沥青路面预防性养护技术开发与效益评价 [J]. 合成材料老化与应用, 2022, 51(06): 102-104.