

高速公路沥青路面预防性养护技术与应用效果研究

潘燕丽

云南云岭高原养护工程有限公司 云南 曲靖 655000

摘要：高速公路沥青路面预防性养护技术通过早期干预，在路面性能未显著衰退时实施修复与强化措施，有效延缓裂缝、车辙、抗滑衰减等病害发展。典型技术包括微表处封层、稀浆封层、复合封层及薄层罩面等，可提升路面平整度、抗滑性及耐久性。实践表明，预防性养护较矫正性养护可降低30%-50%全生命周期成本，延长路面使用寿命4-8年，同时减少交通事故风险，实现经济效益与社会效益双提升。

关键词：高速公路沥青路面；预防性养护技术；应用效果

引言：我国高速公路里程持续增长，沥青路面在长期使用中，受车辆荷载、环境变化等因素影响，易出现裂缝、车辙、表面功能衰减等病害，影响行车安全与路面寿命。传统养护方式多侧重于病害出现后的修复，成本高且效果有限。预防性养护技术强调在路面性能未严重恶化时主动干预，通过科学手段延缓病害发展。研究该技术体系与应用效果，有助于优化养护策略、降低全生命周期成本，推动高速公路养护高质量发展。

1 高速公路沥青路面病害机理与预防性养护理论

1.1 常见病害类型及成因

(1) 裂缝类。温缩裂缝多因温度剧烈变化引发，沥青材料随温度降低收缩，当收缩应力超过路面抗拉强度时，便会产生横向或纵向裂缝，低温地区冬季尤为高发。反射裂缝则源于基层或底基层病害，基层开裂后，在车辆荷载与环境因素共同作用下，裂缝向上反射至沥青面层，常见于半刚性基层沥青路面。(2) 变形类。车辙主要是高温环境下，沥青混合料黏结力下降，在车辆反复碾压作用下，路面出现永久性纵向凹陷，重载车辆通行频繁路段更易出现。拥包多因路面局部沥青混合料高温稳定性不足，或施工时层间黏结不良，在车辆荷载推挤下，路面隆起形成鼓包，常出现在交叉口、停车带等车辆启停频繁区域。(3) 表面功能衰减类。抗滑性能下降是由于长期车轮磨损，沥青路面表面集料棱角被磨平，构造深度减小，雨天易引发打滑风险。渗水系数增大则因路面使用过程中，表面空隙被灰尘、杂物堵塞或沥青老化剥落，导致雨水下渗能力增强，进而加剧路面内部结构损坏。

1.2 预防性养护核心理念

(1) 时机选择理论。该理论强调基于路面性能指标确定养护时机，路面结构强度指数(PSSI)反映路面承载能力，低于65时需考虑养护；路面状况指数(PCI)

评估路面破损程度，低于70时需开展养护，避免病害进一步发展。(2) 成本效益分析。通过全生命周期成本模型，对比不同养护方案的前期投入、中期维护与后期修复成本，优先选择成本低且使用寿命长的方案，如预防性养护比病害发生后修复可降低30%-50%的总成本，提升经济效益。(3) 可持续性理念。注重资源循环利用，将铣刨的旧沥青混合料再生利用，减少石料开采；推广环保型沥青材料，如温拌沥青，降低施工过程中有害气体排放，同时提升路面耐久性，符合绿色交通发展需求^[1]。

2 高速公路沥青路面预防性养护技术体系与适用性分析

2.1 表面封层类技术

(1) 碎石封层。同步碎石封层采用专用设备同步洒布改性沥青与单一粒径碎石(通常9.5-13.2mm)，碾压后碎石嵌锁牢固，可有效密封路面、提升抗滑性，适用于路面轻微裂缝与渗水问题；稀浆封层由乳化沥青、4.75mm以下集料、填料按体积比6:80:14左右配比，搅拌成流态稀浆，人工或机械摊铺，厚度3-5mm，适合低交通量路段表面功能修复。(2) 微表处技术。材料以改性乳化沥青(用量6%-8%)为胶结料，搭配0-5mm级配集料、1.5%-2.5%填料及0.3%-0.5%水；施工采用摊铺机匀速推进(速度2-4m/min)，一次性成型，无需碾压，2h后可开放交通，能高效解决路面抗滑不足、轻微车辙问题。(3) 复合封层。橡胶沥青由废旧轮胎橡胶粉(掺量15%-20%)与基质沥青改性制成，黏结强度是普通沥青的2-3倍；施工时先洒布橡胶沥青，再同步铺筑13.2-19mm碎石，形成双层防护结构，抗裂、抗老化性能优异，适合多雨、严寒地区^[2]。

2.2 薄层罩面类技术

(1) 薄层沥青混凝土。SAC-10采用骨架密实型级配，集料最大粒径10mm，空隙率3%-6%，抗车辙能力

强；SMA-5添加0.3%木质素纤维，集料最大粒径5mm，低温抗裂性突出，二者厚度均为2-4cm，适用于中等交通量路段表面破損修复。（2）超薄磨耗层。NovaChip采用间断级配集料（最大粒径10mm）与高黏改性沥青，施工后表面构造深度 $\geq 1.2\text{mm}$ ，降噪效果显著；UTFC（超薄沥青磨耗层）厚度仅1.5-2.5cm，采用高弹性沥青，抗疲劳性能优异，适合高交通量主干道养护。

2.3 裂缝修复类技术

（1）灌缝材料。改性沥青灌缝料（软化点 $\geq 70^\circ\text{C}$ ）低温延伸率高，适合-20°C-60°C地区；硅酮类灌缝料耐高低温（-40°C-80°C）、耐老化，使用寿命达5-8年，适合气候恶劣地区高等级公路。（2）开槽灌缝与贴缝带技术。开槽灌缝需先将裂缝开成V型槽（宽度8-12mm，深

度10-15mm），清理后灌注材料，适用于宽度0.5-5mm裂缝；贴缝带为自黏式高分子材料，直接粘贴于裂缝表面，施工效率比开槽灌缝高3倍，适合窄缝（ $< 0.5\text{mm}$ ）快速处理。

2.4 再生修复类技术

（1）厂拌热再生。将铣刨旧料（RAP）破碎筛分后，按20%-50%掺配率与新集料、新沥青混合，再生料性能接近新料，可用于下面层或基层，降低原材料消耗30%以上。（2）就地热再生。通过红外加热机将路面加热至160-180°C（深度5-10cm），铣刨后加入5%-10%新沥青或再生剂，复拌、摊铺成型，施工后12h开放交通，对交通影响小，适合路面结构层完好的路段^[3]。

2.5 技术适用性对比分析

表1 病害类型匹配矩阵

技术类型	裂缝类	变形类	表面功能衰减类
表面封层类	轻微裂缝适用	不适用	适用
薄层罩面类	轻微裂缝适用	轻微变形适用	适用
裂缝修复类	适用	不适用	不适用
再生修复类	适用	适用	适用

（1）交通量、气候条件影响分析。高交通量路段（ $> 5000\text{pcu}/\text{日}$ ）宜选Nova Chip、UTFC（开放交通快）；多雨地区优先微表处、复合封层（密封性好）；严寒地区推荐橡胶沥青复合封层、硅酮灌缝（抗冻裂）。（2）经济性指标。表面封层类：20-50元/ m^2 ，寿命3-5年；薄层罩面类：80-150元/ m^2 ，寿命5-8年；裂缝修复类：15-30元/ m^2 （灌缝）、20-40元/ m^2 （贴缝带），寿命3-6年；再生修复类：厂拌热再生60-120元/ m^2 、就地热再生70-130元/ m^2 ，寿命6-10年。

3 高速公路沥青路面预防性养护效果评价体系构建

3.1 评价指标选取

（1）结构性能。平整度采用3m直尺或激光平整度仪测量，以国际平整度指数（IRI）为核心指标，养护后IRI值需 $\leq 2.0\text{m}/\text{km}$ ，确保车辆行驶舒适性；弯沉值通过贝克曼梁或落锤式弯沉仪（FWD）检测，反映路面承载能力，养护后路面计算弯沉值应小于设计弯沉值，若原路面弯沉值为20（0.01mm），养护后需控制在15（0.01mm）以内，避免结构层进一步损坏。（2）表面功能。抗滑值用摆式仪或动态摩擦系数测试仪（DFT）测定，摆值（BPN）需 ≥ 60 （潮湿路面），动态摩擦系数（DF） ≥ 0.45 （60km/h车速下），保障雨天行车安全；渗水系数采用渗水仪检测，普通路段需 $\leq 100\text{mL}/\text{min}$ ，高速公路隧道路段需 $\leq 50\text{mL}/\text{min}$ ，防止雨水下渗引发基层病害。（3）耐久性。老化程度通过沥青针入度、延度

变化评估，养护后沥青针入度衰减率需 $\leq 15\%$ ，延度损失率 $\leq 20\%$ ；再养护周期结合路面性能衰减规律，若未养护路面再养护周期为3年，预防性养护后需延长至5年以上，体现养护对路面寿命的延长作用。（4）经济性。成本效益比（Benefit-Cost Ratio, BCR）为养护后减少的病害修复成本与养护投入成本的比值， $BCR \geq 1.5$ 为经济合理，如某路段预防性养护投入20万元，后续5年减少修复成本40万元， $BCR = 2$ ，符合经济性要求。

3.2 评价方法

（1）层次分析法（AHP）确定指标权重。构建“目标层（养护效果评价）-准则层（结构性能、表面功能、耐久性、经济性）-指标层（平整度、弯沉值等）”三级层次结构，通过专家打分构建判断矩阵，计算各指标权重。通常结构性能权重0.35、表面功能0.30、耐久性0.20、经济性0.15，突出路面核心性能的重要性。（2）模糊综合评价模型。将各指标检测结果转化为模糊评价矩阵，结合AHP确定的权重，通过模糊合成运算得出综合评价结果。设定“优秀（85-100分）、良好（70-84分）、合格（60-69分）、不合格（ < 60 分）”四级标准，若某路段综合得分82分，评价为“良好”，表明养护效果达标。（3）长期跟踪监测数据。选取相同气候、交通条件的对照路段，一组实施预防性养护，一组不养护，连续3-5年跟踪监测性能指标。如某高速公路养护路段5年后PCI值75，未养护路段PCI值58，通过数据对比直

观验证预防性养护对路面性能的提升效果，为后续养护决策提供案例支撑^[4]。

4 高速公路沥青路面预防性养护技术推广的制约因素与对策

4.1 主要问题

(1) 养护时机判断主观性强。当前养护时机选择多依赖人工经验，虽有PSSI、PCI等指标参考，但实际操作中易受人员专业水平差异影响。例如部分地区因未建立动态监测机制，仅通过肉眼观察路面破损情况决定养护时间，常出现“养护过早”导致资源浪费，或“养护过晚”使病害扩大的问题。某省高速公路曾因仅凭经验推迟养护3个月，导致路面裂缝率从8%升至25%，后续修复成本增加40%。(2) 技术标准不统一。不同地区、施工单位对预防性养护技术的参数要求差异较大。以微表处技术为例，部分地区规定改性乳化沥青用量为6.5%，而另一地区则为8%；碎石封层中碎石粒径选择也缺乏全国统一标准，从9.5mm到19mm不等。标准混乱导致技术质量参差不齐，如某跨区域高速公路采用不同标准施工的微表处路段，1年后抗滑值差异达15BPN，部分路段因集料级配不符出现早期剥落。(3) 长期效益认知不足。部分管理单位更关注短期成本，对预防性养护的长期经济效益认识不深。由于预防性养护需提前投入资金，而其减少后期修复成本的效果需3-5年才能显现，导致一些地区优先选择“病害发生后再修复”的模式。某地级市高速公路曾因拒绝投入200万元预防性养护资金，3年后路面出现大面积车辙，最终花费800万元进行大修，反而增加了经济负担。

4.2 优化建议

(1) 建立基于大数据的养护决策系统。整合路面监测数据（如IRI、弯沉值）、交通量数据、气候数据，构建省级或国家级大数据平台。通过AI算法分析数据，自动生成养护时机预警，例如当系统监测到某路段PCI值连续6个月下降速率超过5%/月时，自动推送养护建议。目前江苏、浙江等省份已试点该系统，养护时机判断准确

率提升至90%，资源浪费率降低25%。(2) 推广标准化施工工艺。由交通运输部门牵头制定全国统一的预防性养护技术标准手册，明确各技术的材料参数、施工流程及质量验收指标。例如规定微表处技术中改性乳化沥青用量需控制在6%-7%、摊铺厚度3-5mm；超薄磨耗层施工温度不低于160°C。同时开展标准化培训，要求施工人员持证上岗，确保工艺落地，预计可使技术质量达标率提升至95%以上。(3) 加强全生命周期成本宣传。通过案例宣讲、成本测算对比等方式，向管理单位普及全生命周期成本理念。编制《预防性养护经济效益手册》，收录不同技术的短期投入与长期节省数据，例如明确“每1元预防性养护投入可减少3-5元后期大修成本”；组织实地观摩，让管理单位直观感受养护路段与未养护路段的性能差异，转变“重短期、轻长期”的认知，推动预防性养护技术常态化应用。

结束语

高速公路沥青路面预防性养护技术通过主动干预与科学维护，有效延缓了路面病害发展，提升了路用性能与服务寿命。研究表明，合理选用微表处、稀浆封层等预防性措施，不仅能降低30%以上的全生命周期养护成本，还可减少交通事故风险，实现经济效益与社会效益的统一。未来需进一步结合智能监测技术，优化养护时机决策，推动预防性养护向精准化、智能化发展，为高速公路可持续运营提供坚实保障。

参考文献

- [1]霍婷婷.高速公路沥青路面典型病害及预防性养护技术[J].四川水泥,2021,(04):42-43.
- [2]陈宣齐.封层微罩面技术在高速公路沥青路面预防性养护的应用[J].福建交通科技,2024,(11):98-100.
- [3]孔予民.高速公路沥青路面预防性养护技术的应用[J].汽车周刊,2025,(13):122-124.
- [4]张彩虹.山区高速公路沥青路面预防性养护技术应用研究[J].交通节能与环保,2025,(15):139-140.