

# Research on early disease treatment technology of asphalt pavement based on preventive maintenance concept

Yonghui Ji

Handan Transportation Construction Investment Management Center, Handan, Hebei, 056000, China

## Abstract

Asphalt pavement often exhibits early-stage distresses such as cracking and spalling during initial service, which compromise structural durability and operational safety. This study, grounded in preventive maintenance principles, investigates classification pathways and causal diagnosis techniques for typical early-stage distresses. A comprehensive technical system integrating indicator-based early warning, material repair, and equipment intervention has been developed. Field test sections were designed to validate the integrated application and effectiveness of this technical framework, establishing a closed-loop management mechanism. The findings provide technical support for highway maintenance authorities to enhance the scientific rigor and timeliness of maintenance responses, demonstrating significant application value and engineering guidance implications.

## Keywords

asphalt pavement; preventive maintenance; early-stage distresses; technical pathways; performance verification

# 基于预防性养护理念的沥青路面早期病害治理技术研究

姬永辉

河北省邯郸市交通建设投资管理中心, 中国·河北邯郸 056000

## 摘要

沥青路面服役初期常出现裂缝、剥落等早期病害, 影响结构耐久与使用安全, 文章基于预防性养护理念, 研究了典型早期病害的类型识别路径与成因诊断技术, 构建了以指标预警、材料修复与设备干预为核心的治理技术体系, 设计现场试验段对技术路径进行集成应用与效果验证, 形成了闭环管控机制。研究成果可为公路管养单位提供早期干预的技术支撑, 提升养护响应的科学性与时效性, 具有推广应用价值与工程指导意义。

## 关键词

沥青路面; 预防性养护; 早期病害; 技术路径; 性能验证

## 1 引言

近年来交通荷载加剧与环境变化叠加影响下, 沥青路面在服役早期频发裂缝、剥落、水损等病害, 常规事后修复方式存在滞后性与资源浪费问题, 预防性养护理念强调在病害初生阶段实施主动干预已成为提升路面耐久性的关键路径。文章基于此聚焦典型早期病害的识别类型与形成机制, 构建技术响应指标体系, 匹配材料封闭修复工艺与局部快速干预设备, 提出系统化的治理流程, 并在不同路况条件下开展试验段验证与性能变化评估, 为建立以风险感知为导向的养护机制提供技术基础与实施方案。

## 2 沥青路面早期病害的类型识别与成因诊断

### 2.1 表面裂缝的识别技术路径

浅层线性裂缝在早期阶段具有宽度小、分布不均、动态扩展等特征, 常规人工巡查难以实现高精度识别。采用激光扫描技术构建高密度点云数据, 结合纵横向裂缝特征提取算法, 可实现裂缝长度、宽度及分布密度的几何参数量化。图像识别模块以深度卷积神经网络为核心, 融合灰度梯度增强与边缘检测算法, 提升裂缝目标的识别准确率与噪声抑制能力。数据建模阶段引入裂缝扩展预测模型, 对不同位置的裂缝发展趋势进行风险预判, 为后续病害处治提供分区分级依据, 增强识别技术的应用实效与工程针对性。

### 2.2 局部剥落的形成机理分析

剥落类病害的发生与沥青混合料结构完整性高度相关, 剥落初期表现为集料脱落、表层松散, 深层则可能引发结构断层<sup>[1]</sup>。沥青黏结性能下降源于老化程度增加与低温脆化作用, 降低了骨料之间的黏附强度, 雨水入渗后进一步加剧界

【作者简介】姬永辉(1982-), 男, 中国河北邯郸人, 本科, 工程师, 从事交通运输工程技术方向研究。

面剥离。集料表面粗糙度不足或亲水性偏高易导致薄膜不均,形成局部应力集中区域,诱发微观脱黏点扩展。水稳定性不足表现为动水荷载作用下空隙结构失稳,引起骨架塌陷与材料崩解,综合成因路径呈现出“材料性能退化—界面失效—局部剥落”的演化链条,对混合料设计、施工压实与后期维护提出更高要求。

### 2.3 水损破坏的隐蔽性诊断方法

水损类病害在表面尚未显现明显形变前已在结构内部引起空隙积水、材料分离与基底弱化,需依赖非破坏手段进行深层结构状态评估。电磁波透视技术基于介电常数变化识别含水区域,其频率穿透深度与分辨率呈反比关系,适用于不同结构层次的水分分布监测。红外热成像技术通过捕捉温度场异常区域反映潜在湿损区,其响应精度受限于表层覆盖材料与环境温差变化。综合两种方法构建二维—三维联合识别体系,增强对异质结构中隐蔽水损的检测覆盖率。诊断结果可结合区域气候、交通荷载与结构层厚度校准识别模型,提高治理措施的前期定位精度与干预窗口判断能力。

## 3 预防性养护条件下的病害治理关键技术

### 3.1 预警机制下的病害监测技术

病害监测需依托连续采集的路面性能数据构建动态阈值判定模型,不同类型病害在演化初期具备微小但可捕捉的指标异常变化,如裂缝初生阶段会表现为表面反射系数波动、弹性模量下降与纵剖平整度微幅扰动,需结合时序趋势对多维数据进行融合建模<sup>[2]</sup>。模型设定以结构层厚度、气温变化幅度和车辙累计流量为边界参数,建立不同病害指标的多因子预警域,并引入干扰过滤算法剔除随机误差干扰信号,提高识别精度。

系统应用层部署基于阈值触发的分级响应机制,对病害风险等级进行实时分类,并联动数据采集终端自动调整采样频率与关键位置布控策略。在监测实践中,结合智能巡检车搭载的高频雷达、激光测距与视觉单元可实现病害预兆的多角度捕捉,远程平台则以状态量预测结果输出任务清单,实现由被动检测向主动控制的转换,提升对裂缝萌芽、结构松动、水损积聚等病害的窗口识别与提前干预能力。

### 3.2 沥青类封层材料的功能应用

封层材料在病害早期处治中承担封闭微裂缝、恢复表层防护层功能,需具备一定的渗透性、粘结性及耐久性以适应复杂应力环境<sup>[3]</sup>。雾封层以乳化沥青为基础,能在不改变原结构的前提下封堵浅层裂缝,适用于轻度表层老化或氧化初期病害;微表处则在结构耐受性下降前通过薄层覆盖提升表面抗剪性能,适应裂缝宽度发展至0.5 mm以内的病害阶段。材料渗透深度决定封闭效果,施工环境温度与基层湿度影响粘结强度,因此需根据养护时段与区域气候条件选择不同配比方案。

封层材料性能测试应围绕抗渗、剪切强度与磨耗损失

展开,典型性能如渗透时间控制在2 min内,短期粘结力在0.35 MPa以上,耐磨损值维持在5 g以下。微裂纹闭合率、表层密度恢复值作为反映功能效应的反馈指标,结合结构响应数据可建立材料—工况—效果三维匹配关系,实现技术路径的针对性应用。为对不同沥青类封层材料在预防性养护中的性能差异进行量化对比,构建典型材料的关键技术参数对照表1如下。

表1: 典型沥青类封层材料性能对比表

材料类型	渗透深度 (mm)	粘结强度 (MPa)	抗磨耗 损失 (g)	微裂纹闭合值 (mm)	施工温度 (°C)
雾封层	2.4	0.36	4.2	0.12	25
微表处	4.7	0.41	3.5	0.18	32
稀浆封层	3.2	0.33	4.9	0.09	28

微表处渗透深度与粘结强度最高,封闭效果优于其余两类材料,雾封层适用于轻度老化区域,稀浆封层抗磨性能相对较弱。

### 3.3 小范围修复设备的养护适配性

针对早期病害多表现为局部微小破损的特征,选用便携式修复设备开展小范围快速干预具有响应快、扰动小的技术优势<sup>[4]</sup>。热补设备采用加热—混合—压实一体化模块,实现对局部裂缝或坑槽的快速热合处理,适用于表层剥离与结构离析边缘区的精准修复。高压注灌设备则用于灌注自流型材料或改性乳化沥青,以压力渗透形式封闭裂缝底部或填充空隙区,强化结构连接强度并恢复荷载扩散能力。两类设备在适配不同病害类型时需匹配相应材料体系,控制喷注压力与加热温度,确保介质渗透均匀与接缝融合完整。

设备适配性还体现于施工节奏、人员编制与交通干扰控制能力,便携式热补车组灵活,可实现夜间单车道施工,单点修复时间控制在20分钟以内,适合城市道路与短时封闭场景;注灌装置可配合裂缝预处理模块,实现一体化作业流程,减少人工操作环节与误差率。设备维护周期、作业能耗与材料相容性均需纳入适配性评价指标体系,以形成标准化配置方案,推动路面小范围修复向模块化、专业化方向演进。

## 4 技术集成与治理效果验证

### 4.1 病害治理流程的技术集成模式

病害治理流程需构建从监测识别到施工完成再到性能评估的闭环式技术体系,以实现早期病害的精确干预与过程闭环控制。前端识别模块以巡检数据、传感器信息与图像识别结果为基础,输出病害位置、类型与风险等级,为治理决策提供基础输入。工艺选型依据病害性质与所在结构层位,匹配适宜的材料类型与封闭深度控制范围,形成治理参数库。设备匹配依据工艺所需的处理深度、修复区域范围与施工窗口长度,确定注灌系统、热补装置或薄层封盖模块的协同组合。施工反馈环节引入嵌入式传感器与压实控制系统,

实时采集温度、压实度与材料状态数据，通过无线回传平台接入管理系统，实现治理全过程中每一道工序的闭环记录。各模块之间以标准化数据接口联动运行，确保工艺链条连续、信息不丢失与控制指令准确执行，形成诊断—决策—修复—验证的一体化流程结构。

#### 4.2 现场试验段的工艺实施方案

在预防性养护技术实际应用中，需构建多种路况条件下的对比性试验段以验证工艺适应性与治理性能，试验段设计结合典型路段结构层型与病害分布特征，采用分模块施工与指标跟踪模式，具体包括：

(1) 设置裂缝密集区段，选取雾封层、微表处两类材料开展封闭修复，记录材料渗透时间、表面闭合状态与施工耗时，分析材料适应不同裂缝宽度与分布形态的能力。

(2) 设置表面剥落区域，分别采用热补与注灌设备进行修复，测量设备启停反应时间、施工作业时长与材料融合效果，评估设备快速干预与粘结稳定性表现。

(3) 设置水损风险路段，引入施工前电磁检测结果作为基线，采用高压注灌复合工艺处理潜在空隙区，记录注浆压力、材料渗透深度与恢复模量，验证复合处治在隐蔽性病害中的适应能力。

(4) 设置空白对照段不作干预处理，仅开展常规巡视与数据记录，用于与处治段在性能指标演化趋势上的对比分析，提升方案验证的系统性与实证性。

#### 4.3 路面性能变化的效果监测方法

病害治理效果需通过关键指标的动态监测予以量化，表面平整度反映病害干预后宏观使用状态，结构模量表现治理区域的承载恢复情况，抗水损性则揭示界面粘结与空隙修复程度。各项指标需设置基准值、初始值与治理后阶段性值，对比演化趋势判断修复路径有效性<sup>[6]</sup>。平整度监测采用三米直尺与激光平整仪双向校核，模量测试采用 FWD 设备逐点加载提取回弹响应，抗水损试验基于浸水剥离试验与双侧真空法评估材料渗水率与脱层风险。各项数据同步接入分析平台，绘制随时间变化的曲线趋势，判断性能衰减速率与剩余寿命估算误差范围，并依据异常波动设定二次复查触发条件，实现全周期监控闭环。为评估不同阶段病害治理效果的性能变化趋势，选取平整度、结构模量与渗水深度三项指标构建路面性能指标变化表 2 如下。

表 2：病害治理前后路面性能指标变化表

监测项目	治理前初始值	治理后 7 天	治理后 30 天	治理后 90 天
平整度差值 (mm)	4.8	2.6	2.9	3.3
结构模量 (MPa)	1230	1620	1580	1475
渗水深度 (mm)	11.5	6.2	6.8	7.5

治理后 7 天内平整度得到明显提升，结构模量迅速恢复至 1600 MPa 以上，渗水深度减半，说明封层材料与修复设备在短期内具备较强的闭合效果与承载补偿能力。30 天与 90 天数据表明性能指标随时间出现一定波动，但仍处于治理有效区间，结构模量下降幅度控制在 150 MPa 以内，表明所选工艺在三个月周期内具备稳定性能维持能力。

### 5 结论

研究构建了基于预警识别、指标建模、材料修复与设备干预协同的沥青路面早期病害治理技术体系，形成裂缝、剥落与水损类病害的成因链条与响应路径，匹配了不同材料性能与修复工艺的适配关系，验证了小范围养护设备在局部高效干预中的作业能力，试验段实测数据表明微表处与高压注灌工艺在性能恢复与衰减控制方面具备稳定技术表现，治理流程集成功效良好，监测指标体系具备动态响应能力，研究成果可为预防性养护在路面结构管理中的标准化、工程化应用提供支撑。

#### 参考文献

- [1] 矫涛涛,隋喜忠. 高速公路沥青路面早期病害成因及预防措施[J].汽车周刊,2024,(10):52-54.
- [2] 王士云. 沥青路面病害的早期养护管理对策分析[J].运输经理世界,2024,(13):134-137.
- [3] 王平让,豆海涛. 基于风险理念的公路隧道预防性养护管理研究[J].公路与汽运,2022,(01):155-158.
- [4] 常方圆. 高等级公路沥青路面裂缝的预防性养护[J].交通世界,2020,(07):58-59.
- [5] 张坤,康少博,徐文博,等. 预防性养护理念在石化企业设备维修工作中的应用研究[J].中国标准化,2019,(22):257-258.