

沥青路面典型病害识别与养护对策优化研究

刘宇峰

山东高速集团有限公司东营分公司 山东 东营 257091

摘要：随着交通荷载日益繁重、气候环境日趋复杂以及材料老化等因素叠加，沥青路面在使用过程中不可避免地出现各类病害。科学识别典型病害类型及其成因，是制定高效、精准养护策略的前提。本文系统梳理了裂缝类、变形类、松散剥落类等三大类沥青路面典型病害的表现特征与形成机理，深入分析了当前病害检测与评估技术的发展现状，并在此基础上，结合预防性养护理念、全寿命周期成本分析（LCCA）及智能决策支持系统，提出了面向精准化、绿色化与智能化的沥青路面养护对策优化路径。研究表明，构建“精准识别—科学评估—动态决策—效果反馈”的闭环养护体系，可显著提升养护资金使用效益，延长路面使用寿命，为实现交通基础设施高质量发展提供技术支撑。

关键词：沥青路面；典型病害；病害识别；养护对策；预防性养护；全寿命周期成本；智能养护

引言

沥青混凝土因其良好的平整度、行车舒适性、施工便捷性及可再生利用等优势，被广泛应用于我国高速公路、国省干线及城市主干道。截至2023年底，我国公路总里程已超过540万公里，其中沥青路面占比超过85%。然而，在长期服役过程中，受车辆荷载反复作用、自然环境侵蚀（如温度变化、雨水冲刷、紫外线辐射）、材料性能退化及施工质量缺陷等多重因素影响，沥青路面极易产生各类结构性或功能性病害。这些病害不仅降低路面使用性能，增加交通事故风险，还会大幅缩短道路使用寿命，导致高昂的后期维修成本。传统的“坏了再修”被动式养护模式已难以适应新时代对道路基础设施“安全、耐久、绿色、智能”的发展要求。因此，亟需转变养护理念，从“事后修复”向“事前预防、事中控制”转变，而这一转变的核心在于对路面病害的精准识别与科学归因。只有准确把握病害类型、分布范围、严重程度及其演化规律，才能为后续制定经济、高效、可持续的养护对策提供可靠依据。

1 沥青路面典型病害类型及成因分析

沥青路面病害种类繁多，根据其形态特征与力学机制，可大致分为裂缝类、变形类和松散剥落类三大类。

1.1 裂缝类病害

裂缝是沥青路面最早出现且最为普遍的病害形式，其不仅破坏路面整体性，更会加速水分侵入，诱发次生病害。横向裂缝通常垂直于道路中心线，间距较为规则，主要源于温度骤变引起的收缩应力超过沥青混合料的抗拉强度，尤其在寒冷地区冬季表现尤为突出；此外，半刚性基层自身的干缩或温缩开裂也会向上反射至

面层，形成典型的反射型横向裂缝。纵向裂缝则多沿行车方向分布于轮迹带或路肩区域，其成因常与路基边缘压实不足、排水不畅引发的差异沉降密切相关，亦可能由施工接缝处理不当或重载车辆长期偏载行驶所致。当路面在反复荷载作用下发生疲劳损伤时，初期微裂缝逐渐扩展并相互贯通，最终形成网状裂缝（龟裂），这是沥青老化、结构层厚度不足或基层承载力下降共同作用的结果。特别值得注意的是，反射裂缝虽起源于下卧刚性或半刚性基层的开裂，但其发展速度与严重程度直接受上覆沥青层厚度、材料韧性及层间粘结状态的影响，若未及时处治，极易演变为结构性破坏。

1.2 变形类病害

变形类病害主要体现为路面几何形态的异常改变，严重影响行车平顺性与安全性。车辙是最具代表性的变形病害，尤其在高温季节与重载交通路段频发，其本质是沥青混合料在高温与重复荷载耦合作用下发生塑性流动。根据成因不同，车辙可分为结构性、材料性与磨耗性三类，其中材料性车辙最为常见，与沥青胶结料高温稳定性、矿料骨架嵌挤能力及空隙率控制密切相关。拥包则表现为局部隆起，形似馒头，多出现在交叉口、收费站等车辆频繁启停区域，往往源于沥青用量过多、基层含水率高或施工碾压不均，导致高温下沥青软化上涌。沉陷则是路面整体或局部下沉的现象，通常由路基压实不足、地下水侵蚀、软土固结或地下管线渗漏引起，若伴随唧泥，则表明基层已发生水损害，结构功能严重退化^[1]。此外，波浪（搓板）病害呈现周期性起伏，多因基层平整度差、摊铺作业不稳定或混合料离析造成压实不均所致，虽不直接危及结构安全，但显著降低行

车舒适性。

1.3 松散剥落类病害

松散剥落类病害反映了沥青与集料之间粘结性能的丧失,是路面表层功能退化的直接表现。坑槽作为此类病害的终极形态,通常由水分渗入路面结构引发连锁反应:水分子削弱沥青膜与集料的粘附力,导致集料松动,在车轮冲击与泵吸作用下逐步剥落,最终形成凹坑,雨季或冻融循环后尤为严重。松散则表现为表层集料散失、粗骨料裸露,其根源在于沥青老化导致粘结力下降、混合料设计空隙率过大或施工过程中沥青裹覆不充分。泛油现象则相反,表现为高温季节路面出现光亮油膜,多因沥青用量超标、矿粉掺量不足或级配偏细,致使多余沥青在高温下迁移至表面。剥落则是一种更为严重的粘附失效形式,沥青膜整片从集料表面剥离,常与水损害协同发生,尤其在使用酸性集料(如花岗岩)且未采取抗剥落措施的路段更为显著,严重削弱路面耐久性。

2 沥青路面病害识别与评估技术

精准识别是科学养护的前提。近年来,病害检测技术正朝着自动化、智能化、高精度方向发展。

2.1 传统人工调查法

传统人工调查依赖技术人员现场目测、尺量与记录,辅以裂缝宽度仪等简易工具进行病害判别。该方法虽具备直观性强、灵活性高、可结合工程经验判断病害成因等优势,但存在明显局限:调查效率低下,难以覆盖大范围路网;主观性强,不同人员判别标准不一,数据标准化程度差;且在高速公路上作业存在较大安全风险。因此,人工调查目前多用于小范围重点路段复核、自动化设备无法覆盖区域或作为辅助验证手段,难以满足现代大规模路网精细化管理的需求。

2.2 自动化检测技术

为克服人工调查的不足,自动化检测技术迅速发展并广泛应用。激光或超声波断面仪可高速、高精度获取路面纵断面数据,有效识别车辙、沉陷等变形类病害。高速摄像与图像识别系统通过安装于检测车辆的高清摄像头连续采集路面影像,并借助计算机视觉算法自动提取裂缝、坑槽等病害信息。近年来,深度学习模型(如U-Net、YOLO系列)在复杂光照与背景干扰下的病害识别准确率显著提升,已成为主流技术路径。红外热成像技术则通过捕捉路面温度场异常,间接识别基层脱空、含水区域等隐性病害,适用于早期预警^[2]。探地雷达(GPR)利用电磁波穿透路面结构,可非破坏性地探测各层厚度、层间脱空及内部含水状况,为结构性病害诊

断提供关键依据。多种技术的融合应用,正逐步构建起覆盖表观与内部、静态与动态的全方位病害感知体系。

2.3 综合评估体系

单一指标难以全面反映路面综合性能,需构建多维度、标准化的评估体系。路面状况指数(PCI)作为国际通用的功能性评价指标,通过量化不同类型病害的密度与严重程度进行加权计算,能有效表征路面整体破损水平。国际平整度指数(IRI)则从行车舒适性角度评价路面纵断面质量。此外,车辙深度指数(RDI)、抗滑性能指数(SFC)等专项指标分别针对特定功能需求进行评估。在此基础上,路面管理信息系统(PMS)的引入实现了病害数据的空间可视化、历史演变对比与性能衰减趋势预测,将碎片化检测数据转化为结构化决策信息,为科学制定养护计划提供了坚实的数据基础。

3 沥青路面养护对策优化路径

基于精准识别与科学评估,养护对策应遵循“预防为主、防治结合、因地制宜、经济合理”原则,实现从经验型向科学型转变。

3.1 推广预防性养护理念

预防性养护是现代公路养护体系的核心策略之一,其核心在于在路面结构仍处于良好状态、仅出现轻微功能性病害(如微裂缝、轻度车辙、抗滑性能下降等)时,及时采取低成本、高效率的技术措施进行干预,从而有效延缓性能衰减速度、延长使用寿命,并显著降低全生命周期内的综合成本。当前主流的预防性养护技术包括:(1)微表处:采用聚合物改性乳化沥青与严格级配的细集料拌和后摊铺于路表,形成一层致密耐磨的功能层,能有效封闭微裂缝、恢复抗滑性能并改善外观,适用于轻度病害、交通量中等的路段;(2)稀浆封层:成本较低,主要用于封闭表面孔隙、防止水分侵入和延缓沥青老化,适用于尚未出现结构性损坏但存在渗水风险的路段;(3)雾封层:通过喷洒低浓度乳化沥青,渗透填充路面微小空隙,适用于老化初期、无明显破损的沥青路面,施工便捷、对交通干扰小;(4)超薄磨耗层:厚度通常为1.5–2.5cm,兼具功能性修复与一定结构补强能力,适用于中等及以上交通量、已有轻微车辙或抗滑不足的路段^[3]。推广预防性养护不仅是技术手段的更新,更是养护理念的根本性变革——从“坏了再修”转向“未坏先护”,从短期应急处理转向长期性能管理。

3.2 基于全寿命周期成本(LCCA)的决策优化

传统养护决策往往过度关注初期工程造价,忽视了长期运营维护成本、用户延误损失、车辆磨损及环境影响等隐性支出,容易导致“省小钱、花大钱”的非理性

选择。全寿命周期成本分析（LifeCycleCostAnalysis, LCCA）则提供了一种系统化、量化的决策工具，将建设成本、周期性养护费用、交通中断造成的社会成本、车辆运营成本以及碳排放等环境外部性纳入统一评估框架，并通过折现方法计算各方案在整个使用周期内的总经济代价。例如，面对一条剩余寿命约3–5年的沥青路面，若仅考虑短期支出，可能倾向于采用多次预防性养护；但若引入LCCA模型，综合考虑未来5–10年内可能发生的多次干预、交通管制成本及用户时间损失，则一次性铣刨重铺或加铺高性能罩面可能更具经济优势。通过LCCA，管理者可在多种技术路径中优选总成本最低、综合效益最高的方案，实现财政资金配置的最优化与养护策略的科学化。

3.3 构建智能养护决策支持系统

随着大数据、人工智能（AI）、物联网（IoT）和数字孪生等新一代信息技术的发展，构建智能化、平台化的养护决策支持系统已成为行业趋势。该系统以“数据驱动、模型支撑、闭环反馈”为核心逻辑，形成“感知—分析—决策—执行—反馈”的完整管理闭环。具体而言，系统首先整合多源异构数据：包括自动化检测车采集的平整度、车辙、裂缝等指标，无人机航拍影像，布设于关键路段的固定传感器实时监测数据，以及历史养护记录、交通流量、气候环境等辅助信息，构建动态更新的“路面数字档案”。在分析层，利用机器学习模型（如长短期记忆网络LSTM、随机森林、图神经网络等）对病害演化趋势进行高精度预测，识别高风险路段^[4]。在决策层，结合LCCA模型、资源约束（如预算、工期、材料供应）、交通组织要求等多目标优化算法，自动生成若干技术可行、经济合理的养护方案库，并支持人工干预与比选。方案实施后，系统通过后评估机制跟踪实际效果，持续修正预测模型参数，实现自我进化与决策优化。

3.4 推进绿色低碳养护技术

推广应用绿色低碳养护技术成为行业可持续发展的必然选择。目前主要技术路径包括：（1）冷再生技术：就地回收旧沥青路面材料（RAP），添加乳化沥青

或泡沫沥青进行常温拌和与摊铺，实现旧料100%循环利用，显著减少新材料开采、运输能耗及废弃污染，碳排放可降低40%以上；（2）温拌沥青技术：通过有机添加剂、化学发泡或物理发泡工艺，将沥青混合料拌和与施工温度降低30–50℃，在保证性能的同时，减少燃料消耗15–30%，并大幅降低烟气与有害气体（如VOCs）排放；（3）高掺量RAP应用：在热拌沥青混合料中掺入30%–50%甚至更高比例的回收料，通过优化级配设计与再生剂配方，在保障路用性能的前提下提升资源循环率。未来，应加快建立覆盖材料标准、施工工艺、设备配套、碳排放核算的绿色养护技术标准体系，完善政策激励机制，推动绿色养护从试点示范走向规模化应用，助力交通行业实现碳达峰、碳中和目标。

4 结语

本文系统梳理了裂缝、变形、松散三大类典型病害的特征与成因，评述了从人工调查到智能识别的技术演进，并提出以预防性养护为核心、LCCA为依据、智能系统为支撑、绿色低碳为导向的养护对策优化路径。未来研究应聚焦以下方向：一是多源异构数据融合：整合遥感、BIM、IoT等数据，构建数字孪生路面模型；二是病害演化机理深度建模：结合材料微观性能与宏观响应，建立高保真预测模型；三是养护机器人与无人化施工：提升作业安全性与效率；四是碳足迹核算与绿色养护标准体系：推动行业可持续发展。唯有持续推进技术创新与管理变革，方能实现沥青路面“延寿命、降成本、保安全、促绿色”的高质量发展目标。

参考文献

- [1]高学华.沥青路面典型病害机理及防治措施研究[J].运输经理世界,2024,(18):133-135.
- [2]田硕.沥青路面典型病害成因及预防性养护技术分析[J].交通世界,2025,(11):74-76.
- [3]周红锋.沥青路面典型病害分析及预防性养护技术研究[J].工程机械与维修,2024,(08):111-113.
- [4]吴智乐,张钰.既有道路典型沥青路面病害分析及养护措施研究[J].交通世界,2024,(09):42-44.