

公路沥青路面早期病害成因分析及预防性养护决策优化

申月婷 田 苗

陕西交通控股集团有限公司榆靖分公司 陕西 榆林 718100

摘 要：本文深入分析了公路沥青路面早期病害类型及其成因，涵盖了裂缝类、变形类和松散类等主要病害，并探讨了交通荷载、环境、材料、施工和设计等因素对病害产生的影响。在此基础上，研究了预防性养护措施，包括裂缝修补、表面封层、薄层罩面及其他相关技术，并对其适用性进行了分析。文章还强调了预防性养护时机的确定方法，构建了预防性养护决策优化模型，提出了以养护成本最小化和路面使用寿命最大化为目标的决策优化思路，为公路沥青路面的有效养护提供理论依据和技术支持。

关键词：公路沥青路面；早期病害；成因分析；预防性养护；决策优化

1 公路沥青路面早期病害类型

1.1 裂缝类病害

裂缝类病害是沥青路面最常见的早期损坏形式之一，主要包括横向裂缝、纵向裂缝和网状裂缝。（1）横向裂缝：横向裂缝通常与路面中心线基本垂直，缝宽不一，缝长有贯穿整个路幅的，也有部分路幅的。这种裂缝多由于沥青面层温度收缩或半刚性基层收缩裂缝的反射而形成。在寒冷地区，由于温度骤降导致沥青面层产生较大收缩应力，当收缩应力超过沥青混合料的抗拉强度时，就会产生横向裂缝。此外，半刚性基层收缩裂缝的反射也是横向裂缝产生的重要原因。（2）纵向裂缝：纵向裂缝一般呈条带状，平行或基本平行于道路中心线，裂缝宽度不一，但基本连贯。这种裂缝多由于地基沉降不均匀、路基施工质量控制不严或路基拓宽处理不当等引起。地基沉降不均匀会导致路基产生不均匀变形，从而在沥青面层形成纵向裂缝。而路基施工质量控制不严，如压实度不足、分层填筑过厚等，也会导致路基稳定性下降，进而引发纵向裂缝。（3）网状裂缝：网状裂缝是沥青面层因结构性破坏而逐渐形成相互交错的裂缝。这种裂缝的形成原因较为复杂，通常与行车荷载作用、路面结构强度不足、基层软弱或水稳性差等因素有关。在行车荷载的反复作用下，沥青面层逐渐产生疲劳损伤，当损伤积累到一定程度时，就会形成网状裂缝。

1.2 变形类病害

变形类病害主要包括车辙、拥包和波浪等，这些病害会降低路面的平整度，影响行车舒适性和安全性。（1）车辙：车辙是车轮在路面上反复滚动碾压形成的连续变形带。这种病害通常由于沥青混合料高温稳定性不足、车轮荷载反复作用以及基层或土基变形能力不足等因素引起。在高温条件下，沥青混合料容易发生剪切变

形，当车轮荷载反复作用时，就会在车轮轨迹处形成车辙。（2）拥包：拥包是指沥青面层局部隆起的现象。这种病害通常由于基层局部强度不足或水稳性差、沥青面层施工质量控制不严（如沥青用量过多、矿料级配不良等）以及行车荷载的反复作用等因素引起。基层强度不足会导致其在车轮荷载作用下产生变形，进而使沥青面层发生隆起^[1]。（3）波浪：波浪是指路面沿行车方向出现的高低起伏现象。这种病害通常由于沥青面层厚度不均匀、基层不平整或施工质量控制不严等因素引起。在行车荷载的作用下，沥青面层会沿着基层的不平整处产生波浪变形。

1.3 松散类病害

松散类病害主要包括坑槽、松散和剥落等，这些病害会严重降低路面的使用性能。（1）坑槽：坑槽是指路面局部出现凹陷的现象。这种病害通常由于沥青混合料施工质量控制不严（如沥青用量不足、矿料级配不良等）、基层强度不足或水稳性差以及行车荷载的反复作用等因素引起。当沥青面层出现裂缝或松散等病害时，水分容易渗入基层并软化土基，进而在行车荷载的作用下形成坑槽。（2）松散：松散是指沥青面层颗粒脱落、失去粘结力的现象。这种病害通常由于沥青混合料施工质量控制不严、基层强度不足或水稳性差以及环境因素（如高温、多雨等）的影响而引起。在高温和多雨条件下，沥青容易老化变质，从而降低其粘结力，导致沥青面层颗粒脱落。（3）剥落：剥落是指沥青面层与基层或沥青面层内部颗粒之间发生分离的现象。这种病害通常由于沥青混合料配合比设计不当、基层与沥青面层之间的粘结力不足以及环境因素（如高温、水侵蚀等）的影响而引起。在高温和水侵蚀的条件下，沥青容易软化并失去粘结力，从而导致沥青面层与基层或内部颗粒之间

发生分离。

2 公路沥青路面早期病害成因分析

2.1 交通荷载因素

交通荷载是公路沥青路面早期病害的重要诱因。随着物流运输业蓬勃发展,重载车辆比例持续攀升。重载车辆对路面施加的荷载远超普通车辆,巨大的车轮压力使路面基层产生更大压应变,长期作用下基层易疲劳破坏,进而引发裂缝等病害。同时,交通量的急剧增长也不容忽视。车辆频繁碾压路面,荷载作用次数大幅增加,路面疲劳损伤不断累积。尤其在交通繁忙路段,路面承受的交通压力更为巨大,早期病害出现得更早、更严重,严重影响路面的使用性能和寿命。

2.2 环境因素

环境因素对公路沥青路面性能影响显著。温度变化是关键因素之一,高温季节沥青混合料粘度降低、强度下降,在车辆荷载反复作用下易产生车辙、拥包等变形病害;低温季节沥青混合料收缩,易产生裂缝。降水也是重要因素,雨水渗入路面会降低沥青与集料粘结力,在车辆荷载反复冲击下,易引发坑槽、松散等病害,还会使路基软化,导致不均匀沉降引发裂缝^[2]。此外,长期紫外线辐射会使沥青老化,性能变差,抗裂能力下降,增加路面裂缝出现的几率。

2.3 材料因素

材料质量直接影响公路沥青路面质量。沥青质量至关重要,若沥青针入度、软化点、延度等指标不符合要求,会降低路面性能。针入度过大,沥青粘度低,路面易车辙;软化点过低,高温下沥青易流淌,影响稳定性。集料质量也不容忽视,集料级配不合理会使沥青混合料空隙率异常,影响防水和耐久性;集料形状不规则、表面粗糙度不足,会降低沥青与集料粘结力,导致松散、剥落等病害。因此,严格控制材料质量保障路面质量的关键。

2.4 施工因素

施工因素对公路沥青路面质量影响巨大。施工工艺不当会引发诸多问题,如沥青混合料拌合温度、时间控制不准,会导致性能不稳定;摊铺温度不均匀、厚度不一致,影响平整度和强度;压实不足或过度,都会降低密实度和稳定性。施工质量控制不严也是常见问题,若对原材料质量检验不严格,对施工工艺执行不到位,对路面平整度、压实度等指标检测不及时,会使路面存在质量隐患,为早期病害埋下伏笔,缩短路面使用寿命。

2.5 设计因素

设计因素在公路沥青路面早期病害成因中也不可忽

视。路面结构设计不合理会影响使用性能,若路面结构层厚度设计不足,无法承受交通荷载,易导致路面损坏;基层材料选择不当,基层强度和稳定性不足,会影响路面整体性能。排水设计不完善同样严重,若路面横坡、纵坡设计不合理,排水设施设置不足或损坏,会使路面长期积水,加速水损害,引发坑槽、松散等病害。因此,科学合理的设计是保障公路沥青路面质量和使用寿命的重要前提。

3 公路沥青路面预防性养护措施研究

3.1 预防性养护技术分类

裂缝修补技术主要包括灌缝和贴缝,灌缝适用于宽度在3-15mm的裂缝,通过加热灌缝胶并注入裂缝,形成弹性密封层,阻止雨水下渗和杂物进入,防止裂缝进一步扩展。贴缝则适用于宽度小于3mm的裂缝,使用专用的贴缝带直接粘贴在裂缝表面,其黏结性和柔韧性好,能适应裂缝的变形,施工速度快,对交通影响小。

3.1.1 表面封层技术

表面封层技术包括稀浆封层、微表处和碎石封层。稀浆封层能有效填补路面微小裂缝和空隙,提高平整度和抗滑性能;微表处采用改性乳化沥青,具有更高的强度和耐磨性,能修复车辙、填补裂缝,同时改善路面外观。碎石封层则通过喷洒沥青结合料并撒布碎石,提高路面抗滑性能和耐磨性,封闭空隙,防止水渗入。

3.1.2 薄层罩面技术

薄层罩面技术主要包括超薄磨耗层和薄层沥青混凝土罩面,超薄磨耗层采用高黏改性沥青和间断级配集料,厚度薄、施工快,能改善路面平整度,修复轻微车辙和裂缝。薄层沥青混凝土罩面则适用于路面破损较严重、平整度较差的路段,能有效提高路面承载能力和使用性能^[3]。

3.1.3 其他预防性养护技术

再生养护技术通过喷洒再生剂恢复老化沥青的性能,延缓路面老化,适用于轻度老化的路面。雾封层技术则将乳化沥青或沥青改性乳液均匀喷洒在路面上,封闭空隙,防止水分侵入,同时改善路面外观,常用于预防性养护初期。

3.2 预防性养护技术适用性分析

不同的预防性养护技术适用于不同类型和程度的路面病害,裂缝修补技术主要针对裂缝类病害,灌缝适用于较宽裂缝,贴缝适用于较窄裂缝;表面封层技术适用于路面轻微破损、抗滑性能下降、防水性能不足等情况,稀浆封层和微表处可修复轻微车辙,碎石封层能有效提高路面抗滑性能;薄层罩面技术适用于路面破损较

严重、平整度较差、承载能力下降的阶段；再生养护和雾封层主要用于延缓路面老化，提高路面防水性能。在选择预防性养护技术时，还需考虑路面的交通量、使用年限、当地气候条件等因素。交通量大的路段应选择施工速度快、对交通影响小的技术；高温多雨地区应优先选择防水性能好的技术；路面使用年限较长、老化严重的路段可采用再生养护技术。综合各方面因素，合理选择预防性养护技术，才能达到最佳养护效果。

3.3 预防性养护时机确定

预防性养护时机的确定是保证养护效果、提高养护效益的关键。过早进行预防性养护，会造成资源浪费；过晚则病害已发展严重，养护成本增加，效果也不理想。目前，确定预防性养护时机主要依据路面状况指数（PCI）、行驶质量指数（RQI）、抗滑性能指数（SRI）等指标。当路面PCI值在70-85之间，路面处于良好状态，但已出现轻微病害迹象，此时是进行预防性养护的最佳时机。例如，当路面出现少量细微裂缝、抗滑性能开始下降时，及时采用裂缝修补技术、表面封层技术等进行养护，可有效阻止病害发展，延长路面使用寿命。此外，还可结合路面使用年限、交通量增长情况等因素综合判断，制定科学合理的预防性养护计划。

4 公路沥青路面预防性养护决策优化模型构建

4.1 决策优化目标与约束条件

预防性养护决策优化的核心目标，是在确保路面使用性能达标的基础上，达成养护成本最小化与路面使用寿命最大化。养护成本涵盖直接与间接两方面，直接成本包括材料、人工、设备等费用，间接成本则涉及交通延误损失、环境影响成本等。通过优化决策，合理选定养护技术与时机，可有效降低养护成本，提升养护资金使用效率。决策过程需遵循一系列约束条件。路面性能约束是关键，养护后路面的各项性能指标，如路面破损状况指数（PCI）、路面行驶质量指数（RQI）、路面抗滑性能指数（SRI）等，必须达到规定标准，以保障行车安全与舒适性。资金约束同样重要，养护资金有限，决策方案必须在预算范围内^[4]。另外，还需考虑施工时间、交通管制等约束条件，尽可能减少养护施工对交通的影响。

4.2 决策变量选择

决策变量是预防性养护决策中需确定的关键因素，主要包括养护技术类型、养护时机和养护周期。养护技术类型众多，需从多种预防性养护技术中挑选，不同技

术对路面性能的改善效果与成本各异。养护时机至关重要，它决定了在路面病害发展到何种程度时进行养护，合理的养护时机能提高养护效果，降低成本。养护周期涉及两次养护之间的时间间隔，需依据路面状况变化和养护技术效果来确定。养护资金分配、施工资源配置等也可作为决策变量。综合考虑这些因素，制定最优的预防性养护决策方案，通过优化决策变量的选择，实现预防性养护决策的科学化与合理化。

4.3 模型构建方法

构建预防性养护决策优化模型可采用多种方法，常用的有层次分析法（AHP）、灰色关联分析法、遗传算法、神经网络等。层次分析法将复杂的决策问题分解为多个层次，通过建立判断矩阵，确定各因素的权重，从而对不同方案进行综合评价和排序。灰色关联分析法通过计算各方案与理想方案的关联度，选择最优方案，适用于数据量少、信息不完全的情况。遗传算法模拟生物进化过程，通过选择、交叉、变异等操作，在解空间中搜索最优解，能有效处理复杂的非线性优化问题。神经网络具有强大的学习和自适应能力，可通过对大量历史数据的学习，建立路面状况、养护技术与养护效果之间的关系模型，为决策提供依据。实际应用中，可根据具体情况选择合适的方法，或结合多种方法构建综合模型，提高决策的准确性和可靠性。

结束语

综上所述，公路沥青路面的早期病害成因复杂多样，需要综合考虑多种因素进行防治。通过科学合理的预防性养护措施和技术手段，可以有效延长路面使用寿命，降低养护成本。随着技术的不断进步和养护经验的积累，公路沥青路面的预防性养护工作将更加精准、高效，为道路交通安全和畅通作出更大贡献。

参考文献

- [1]赵欢,郝建云,熊涛等.论路面跳车指数PBI对路面技术状况指数PQI的影响[J].公路工程,2024,49(3):91-95.
- [2]吕聪.公路沥青路面机械化施工技术 with 质量控制[J].交通世界(下旬刊),2021(5):146-147.
- [3]王雪辉.公路工程沥青路面病害预防性养护技术分析[J].运输经理世界,2023,(33):122-124.
- [4]吴神达.公路工程沥青路面病害预防性养护技术分析[J].散装水泥,2023,(03):93-95.