

高寒地区公路沥青路面病害成因及检测修复技术研究

王绘宇

安徽省七星工程测试有限公司

【摘要】高寒地区气候条件恶劣，低温、冻融循环、强紫外线等因素长期作用，导致公路沥青路面易出现开裂、坑槽、冻胀、沉陷等多种病害，严重影响公路通行安全与使用寿命，增加养护成本。本文结合高寒地区气候与地质特征，系统分析沥青路面各类常见病害的形成机理，梳理当前主流检测技术的应用特点与适用场景，总结针对性修复技术及工程实践经验，结合内蒙古、青海、吉林等高寒地区实际案例，提出技术优化建议，为高寒地区公路沥青路面的设计、施工、养护提供理论支撑与实操参考，助力提升路面耐久性与通行质量，降低全生命周期养护成本。

【关键词】高寒地区；沥青路面；病害成因；检测技术；修复技术

引言

我国高寒地区主要分布在东北、西北及青藏高原等区域，此类地区冬季严寒漫长（极端低温可达 -40°C 以下），夏季短暂炎热，昼夜温差大，且冻融循环频繁、降雪量大、强紫外线辐射，部分区域还存在多年冻土、工业固废堆积等问题。沥青路面因行车舒适、施工便捷等优势，在高寒地区公路建设中应用广泛，但受特殊气候、地质及行车荷载、施工质量等多重因素影响，路面病害出现早、发展快、破坏严重，不仅降低通行效率、威胁行车安全，还大幅增加养护成本，缩短路面使用寿命。近年来，随着高寒地区公路建设里程增加，沥青路面病害问题日益突出，成为制约区域公路高质量发展的瓶颈。目前国内外相关研究多聚焦于单一病害或技术，对病害成因的系统性分析不足，结合实际工程场景的技术整合不够。基于此，本文系统梳理高寒地区沥青路面常见病害类型，剖析多方面成因，对比检测技术优劣，总结修复技术及工程应用效果，提出优化路径，为科学养护与高效管理提供参考，具有重要理论与工程价值。

一、高寒地区公路沥青路面常见病害类型及特征

结合高寒地区气候地质特点及公路养护实践，沥青路面病害主要分为开裂、冻胀与沉陷、坑槽、剥落、车辙五大类，具有显著地域特异性，具体特征如下：

（一）开裂病害

开裂是高寒地区最常见的病害，主要分为温度裂缝、反射裂缝与疲劳裂缝，其中温度裂缝占比达60%以上。温度裂缝多产生于冬季，极端低温使沥青呈脆性，路面温度骤降时，面层收缩受基层约束产生拉应力，超过材料抗拉强度即出现纵向或横向直线裂缝，宽度随温度波动。反射裂缝由基层冻融、干缩开裂反射至面层形成，呈不规则状且易扩展。疲劳裂缝由长期行车荷载反复作用产生，多出现于轮迹带，呈网状，易发展为坑槽。

（二）冻胀与沉陷病害

二者呈周期性交替出现，是冻土地区典型病害。冬季地下水位高或土壤含水量大时，水分冻结体积膨胀（膨胀率9%~11%），导致路基路面隆起、开裂，严重时出现错台；春季冰层融化，土壤含水量饱和、强度下降，路基不均匀沉降，引发面层凹陷、破损。多年冻土地区冻融循环反复，对路面结构造成持续性破坏，饱冰冻土、含土冰层地段病害最为严重。

（三）坑槽病害

多由裂缝发展而来，结合水损害与低温作用形成。冬季雪水通过裂缝渗入面层，低温冻结破坏沥青与集料粘结力，导致面层松散；春季融水无法排出，行车荷载带走松散材料形成坑槽。此类病害发展快、分布不均、修复难，冬季普通冷补料无法施工，导致坑槽持续扩大。内蒙古九原区万永线K10-K11段曾因冬季坑槽反复修补增加养护成本，后通过新

型冷补材料解决。

（四）剥落病害

表现为面层与基层、沥青与集料粘结力丧失，面层脱落、起皮，严重时露出基层。冻融循环是核心诱因，雨水渗入界面冻结破坏黏结，融水滞留进一步降低强度；强紫外线加速沥青老化，加剧剥落。施工中沥青与集料粘附性不足、基层处理不彻底，也会增加病害概率。青海海西公路总段通过网裂修复剂配合碎石处置，有效提升面层黏结强度。

（五）车辙病害

主要发生在夏季，日间气温可达 30℃ 以上，沥青软化后经重型车辆反复碾压，形成永久性车辙；冬季积雪融化后路面摩擦力下降，车辆滑动也会加剧车辙形成。此类病害发生率虽低于其他病害，但修复难度大，严重影响行车舒适性与安全性，重载路段尤为突出。

二、高寒地区公路沥青路面病害成因分析

高寒地区沥青路面病害是气候、地质、材料、施工、运营五大因素共同作用的结果，其中气候与地质是核心诱因，其余因素加速病害发展，各因素相互影响、导致病害多样化。

（一）气候因素：核心诱发因素

低温作用：冬季极端低温使沥青由韧性变为脆性，抗拉、抗裂性能下降，面层收缩产生的拉应力易引发温度裂缝；同时基层土壤冻结，面层与基层粘结力下降，易出现剥离。

冻融循环作用：全年冻融循环可达 30 ~ 50 次，土壤水分冻胀融缩破坏路基结构，降低承载力，引发冻胀、沉陷、开裂，同时破坏沥青与集料黏结，加速坑槽、剥落。

强紫外线辐射：高海拔地区紫外线强烈，加速沥青老化，使其变硬变脆，黏结、抗疲劳性能下降，增加水损害风险。

（二）地质因素：基础影响因素

土壤类型与含水量：高寒地区多为粉质土、粘性土，保水性强、渗透性差，冬季冻胀显著，春季融后强度骤降，易引发沉陷。细颗粒物质在冻融中流失，加剧路基松散。

地下水位：地下水位高的区域，冬季冻胀明显，春季融后路基饱和、承载力下降，易出现沉陷、翻浆。

冻土分布：多年冻土地区冻融交替破坏路面结构，冻土融化产生的水分无法排出，加剧水损害。

（三）材料因素：内在影响因素

沥青材料性能不足：未选用适配低温的沥青，低温延度、抗裂性能差，易开裂脆裂；沥青老化过快，黏结、抗疲劳性能下降。吉林双洮项目曾因沥青质量不达标，导致早期开裂频发，更换合格材料后解决。

集料性能不佳：强度、耐磨性、粘附性不足，易破碎脱落，引发松散、坑槽、剥落。

（四）施工因素：人为影响因素

基层施工质量不达标：压实度、强度不足，在冻融与行车荷载下易开裂沉陷，引发反射裂缝；基层表面清理不彻底、平整度差，导致面层与基层黏结不牢。多年冻土地区未采取隔热防融措施，会导致冻土融化、路基沉陷。

面层施工工艺不规范：摊铺、压实温度控制不当，压实度不足、空隙率大，加剧水损害与冻融破坏；摊铺平整度差、混合料拌合不均，引发局部病害。

排水系统不完善：雨水、雪水无法及时排出，渗入路面与路基，加剧冻融破坏与水损害。

（五）运营因素：外部加速因素

行车荷载影响：重载、超载车辆增多，路面应力超过设计标准，加速疲劳损伤，引发开裂、车辙、坑槽；车辆制动、启动产生的剪切力，破坏面层与基层黏结。

养护管理不到位：早期病害未及时维修，导致病害扩展。冬季选用普通冷补料，修补后易破损。内蒙古九原区采用“畅行 1 号”“畅行 2 号”固废冷补材料，大幅提升修补效果。

冰雪清除影响：融雪剂腐蚀路面，机械除雪冲击损坏表层，加剧病害。

三、高寒地区公路沥青路面病害检测技术

病害检测是科学养护、精准修复的前提，核心是及时发现病害、明确类型与严重程度，为修复方案提供依据。结合高寒地区特点，主流检测技术分为外观检测与内部检测两大类，需合理搭配使用。

（一）外观检测技术

针对路面表层病害，操作便捷、成本低、效率高，适用于大面积普查。一是人工外观检测，通过肉眼观察结合简易仪器，记录病害信息，操作灵活但效率低、主观性强。二是自动化外观检测，车载式系统通过摄像头、激光雷达快速采集数据，自动识别病害，效率高、精度高，适用于长距离检测；无人机检测适用于地形复杂路段，但受天气影响大。

（二）内部检测技术

针对路面内部病害，检测深度深、精度高，适用于病害成因分析与结构健康评估。一是探地雷达检

测 (GPR), 无损、快速, 可检测基层开裂、脱空、冻土分布等, 三维探地雷达可探明路面以下 3 米情况, 但受积雪、冰层影响大。二是红外检测技术, 通过热成像识别内部缺陷, 可在冰雪覆盖下检测, 但受环境温度、风速影响。吉林省研发的红外光谱测试系统, 可判定沥青质量, 广泛应用于高速公路项目。三是钻孔取样检测, 精度高, 可直接获取路面结构参数, 但属于破坏性检测, 效率低、成本高, 仅适用于重点路段。

(三) 检测技术优化与应用建议

一是采用“外观+内部”结合模式, 实现精准检测; 二是优先选用自动化设备, 避开恶劣天气, 降低人工风险; 三是引入大数据、人工智能, 构建智能监测预警系统, 内蒙古九原区数智巡检系统即将投入使用; 四是建立检测数据档案, 跟踪病害发展, 为养护提供参考。

四、高寒地区公路沥青路面病害修复技术

修复核心是“因地制宜、精准修复”, 结合病害类型、严重程度与气候条件, 选择适配技术与材料, 兼顾当前修复与长期抗病害能力, 降低养护成本。结合高寒地区工程实践, 各类病害修复技术如下:

(一) 开裂病害修复技术

根据裂缝宽度与深度选择技术, 核心是封闭裂缝、防止雨水渗入。一是裂缝密封技术, 适用于 0.1 ~ 5mm 中小型裂缝, 选用低温性能优良的密封材料, 施工便捷、成本低。二是裂缝灌浆技术, 适用于宽度大于 5mm 的深层裂缝, 注入抗冻性强的灌浆材料, 修复效果好但工艺复杂、成本高。三是薄层罩面技术, 适用于裂缝密集、平整度好的路段, 铺设改性沥青薄罩面, 封闭裂缝、提升抗裂性能, 青海海西公路总段应用该技术解决网裂问题。

(二) 冻胀与沉陷病害修复技术

核心是提升路基承载力、完善排水。一是路基换填技术, 挖除隐患土壤, 换填级配碎石等抗冻材料, 铺设隔水层, 适用于病害严重路段, 修复稳定但工程量、成本高。二是排水系统优化, 增设路面与路基排水设施, 做好防冻处理, 确保排水畅通。三是面层修复, 修复路基后, 填补沉陷、更换破损面层, 铣刨冻胀凸起部分, 恢复路面平整。

(三) 坑槽病害修复技术

遵循“快修、耐用、适配低温”原则, 分为热修补与冷修补。热修补技术, 适用于大面积、深坑槽, 铣刨破损材料, 填入加热的改性沥青混合料, 压实

度达标, 耐久性强但成本高, 适用于夏秋季。而冷修补技术, 适用于小型坑槽与冬季应急修复, 选用低温适配冷补材料, 施工快捷, 可在 -20℃ 施工。内蒙古九原区“畅行 1 号”“畅行 2 号”固废冷补材料, 固废占比 60%—65%, 成本降低 15%—20%, 耐久周期是普通冷补料的 3 倍。

(四) 修复技术优化与应用建议

首先要选用适配低温的修复材料, 避免病害复发; 其次优化施工工艺, 严控温度、压实度, 完善排水; 同时推行预防性养护, 早期病害及时处理, 内蒙古九原区通过温度感知芯片提供数据支撑; 以及采用综合修复方案, 结合工业固废资源化利用, 实现环境与工程效益双赢。

五、结语

高寒地区沥青路面病害以开裂、冻胀与沉陷、坑槽、剥落为主, 具有发生早、发展快、修复难的特点, 气候与地质因素是核心诱因, 材料、施工、运营因素加速病害发展。外观检测适用于大面积普查, 内部检测适用于病害成因分析, “外观+内部”结合可提升检测精度, 三维探地雷达、红外光谱检测等新技术效果显著。各类病害需选用适配修复技术, 内蒙古、青海、吉林的工程实践提供了宝贵经验。修复需遵循“因地制宜、精准修复、预防为主”原则, 选用适配材料、优化工艺、完善排水, 可提升效果、降低成本。未来可从四方面开展研究: 一是研发高性能、环保型修复材料, 推动工业固废规模化应用; 二是完善智能化检测技术, 构建智能监测预警系统, 推广数智巡检模式; 三是开展长期对比试验, 形成标准化养护修复体系; 四是加强多年冻土地区技术研究, 解决冻胀沉陷难题, 支撑高寒地区公路高质量发展。

参考文献:

- [1] 王艺洋. 高寒地区沥青路面的预防性养护 [J]. 交通世界, 2018(21):56-57.
- [2] 兰华. 分析高寒地区沥青公路的预防性养护 [J]. 科技创新导报, 2019, 16(08):22+24.
- [3] 谢红星, 刘旭强. 高寒地区公路沥青路面施工与控制策略分析 [J]. 石化技术, 2019, 26(02):328.
- [4] 刘旭强. 高寒地区沥青路面的预防性养护探讨 [J]. 化工管理, 2019(01):154-155.
- [5] 张树奎. 高原寒冷地区沥青路面施工技术研究 [J]. 价值工程, 2017, 36(10):138-139.