

多年冻土区域公路路面病害成因及施工防治对策探析

李淑兵

新疆公路建设(集团)有限责任公司, 中国·新疆 昌吉 831100

摘要: 多年冻土区公路作为我国西部边疆地区经济社会发展的生命线, 其建设与运营长期面临着极为复杂的热力学与工程地质挑战。在气候变化与工程扰动的双重驱动下, 多年冻土退化趋势加剧, 导致公路路面病害呈现出频发、早发且反复治理难愈的特征, 严重制约了区域交通基础设施的服务水平与安全韧性。本文系统综述了多年冻土区域公路路面典型病害的类型特征及其多因素耦合成因机制, 深入剖析了冻融循环、水热迁移、荷载作用及施工工艺缺陷对路面结构性能的劣化机理。

关键词: 多年冻土; 公路路面病害; 冻融循环; 主动冷却路基; 施工防治; 水热耦合

Analysis of Causes of Pavement Diseases and Construction Countermeasures in Permafrost Regions

Li Shubing

Xinjiang Highway Construction (Group) Co., Ltd., China Xinjiang Changji 831100

Abstract: Highways in permafrost regions serve as lifelines for socioeconomic development in western border areas of China, yet their construction and operation have long faced complex thermodynamic and geotechnical challenges. Driven by both climate change and engineering disturbances, permafrost degradation is accelerating, leading to frequent, early-onset, and recurrent pavement diseases that are difficult to cure, severely limiting the service level and safety resilience of regional transportation infrastructure. This paper systematically reviews the types and characteristics of typical pavement diseases in permafrost regions and their multi-factor coupled causation mechanisms, and deeply analyzes the deterioration mechanisms of pavement structural performance caused by freeze-thaw cycles, heat and moisture migration, loading effects, and construction process defects.

Keywords: Permafrost; Pavement disease; Freeze-thaw cycle; Active cooling subgrade; Construction prevention and control; Hydrothermal coupling

0 引言

我国是世界上第三大冻土国, 多年冻土分布面积约占国土总面积的五分之一, 主要集中在青藏高原、东北大小兴安岭及西北高山地区。这些区域不仅是国家重要的生态安全屏障, 也是连接边疆与内地、保障国防安全与促进区域协调发展的战略通道。随着西部大开发战略的纵深推进和“一带一路”倡议的实施, 穿越多年冻土区的公路建设规模持续扩大, 技术标准不断提升。然而, 多年冻土是一种对温度变化极其敏感的特殊地质体, 其物理力学性质随温度波动而发生剧烈变化, 具有显著的热不稳定性。自 20 世纪 50 年代青藏公路建成以来, 尽管历经多次改建与技术攻关, 路面病害问题始终是困扰寒区公路工程的核心难题。特别是在全球气候变暖背景下, 多年冻土正经历着前所未有的退化过程, 活动层厚度增加、地温升高、含冰量重分布, 使得原有基于稳态或缓慢变化假设的设计理念与施工

技术逐渐失效。大量路段在通车后短期内即出现严重的纵向裂缝、不均匀沉陷、翻浆冒泥等病害, 不仅大幅增加了全生命周期养护成本, 更对行车安全构成严重威胁^[1]。

1 多年冻土区公路路面病害的多维成因机制解析

要制定科学有效的防治对策, 必须首先厘清病害形成的多尺度、多过程耦合机制, 避免陷入“头痛医头、脚痛医脚”的碎片化治理误区。多年冻土区路面病害并非单一因素所致, 而是热、水、力、材四者在特定时空条件下相互作用、叠加放大的结果。

1.1 冻融循环与水热迁移驱动的路基不均匀变形

冻融循环是多年冻土区路面病害产生的根本内因。在季节性温度波动作用下, 路基土体经历周期性的冻结膨胀与融化沉降。冬季, 水分在温度梯度驱动下向冻结锋面迁移, 形成冰透镜体或冰夹层, 导致路基体积膨胀、强度提

高;春季气温回升,冰体融化使土体含水率急剧增加,有效应力降低,承载力大幅下降,产生不可恢复的塑性变形。由于多年冻土区地表覆盖、地形地貌、水文条件及人为热扰动的空间异质性,路基各部位的冻融深度、速率及含水量存在显著差异,从而引发严重的不均匀变形。这种变形若超出路面结构的协调能力,便会在面层内部产生附加拉应力与剪应力,当应力超过材料疲劳极限时,即诱发纵向裂缝、横向断裂及波浪状沉降^[1]。

1.2 工程热扰动与气候变暖叠加下的冻土退化加速效应

在全球变暖的宏观背景下,多年冻土的自然退化趋势已与工程活动形成强烈的叠加扰动效应,显著放大了路面病害的风险与演化速率。一方面,黑色沥青路面具有高吸热率与低反射率的特性,夏季表面温度可高达 60℃以上,大量热量通过路基向下传导,人为抬升了冻土上限,诱发了原本稳定的深层冻土发生融化。研究表明,普通沥青路面可使路基中心温度较天然地表高出 2-4℃,相当于将当地气候带向北推移数百公里。另一方面,施工期间的临时设施布置、机械作业、取弃土场开挖及排水系统改变,破坏了原生植被的保温隔热层,改变了地表的水热边界条件,造成局部冻土的快速退化与热蚀现象^[1]。

1.3 荷载反复作用与材料性能衰减的协同劣化机制

除了热-水因素外,车辆荷载的反复作用与路面材料在极端环境下的性能衰减也是病害形成的重要推手。多年冻土区公路往往承担着繁重的货运任务,重载车辆的频繁通行对已处于热-水耦合损伤状态的路面结构施加了额外的力学负担。在路基承载力因融沉而周期性波动的条件下,荷载引起的弯拉应力与剪切应力幅值显著增大,加速了沥青混合料的疲劳损伤累积。同时,高原地区强烈的紫外线辐射、极大的昼夜温差及干燥缺氧环境,导致沥青材料老化速率远快于平原地区,表现为针入度下降、延度损失、脆性增加,抗裂性能急剧衰退。低温收缩裂缝在荷载与温度的交替作用下不断扩展、贯通,最终发展为结构性破坏^[4]。

2 适应冻土特性的路面病害施工防治技术体系评述

针对上述复杂的成因机制,多年冻土区公路路面病害防治已从早期的被动修补转向“主动调控、柔性适应、精细施工”的综合治理范式。当前的技术体系主要围绕维持冻土热平衡、提升结构变形协调能力及强化施工质量管控三个维度展开。

2.1 以主动冷却路基为核心的热稳定性保障措施

为从根本上遏制冻土退化引发的路基变形,工程界发展了一系列主动冷却路基技术,旨在通过人工干预降低或维持地基温度,保护冻土上限稳定。目前应用较为成熟的技术包括热棒、片石通风路基、隔热层及遮阳棚等。热棒利用工质气液相变原理,将地基深处的热量单向导出至大气中,具有高效、免维护的特点,特别适用于高温高含水量冻土路段;片石通风路基依靠块石孔隙内空气的自然对流实现散热,兼具结构承载与热调控功能,已在青藏铁路等工程中验证了其长期有效性;聚苯乙烯泡沫板等隔热材料可有效阻隔夏季热量下传,延缓冻土融化,但需关注其长期压缩蠕变性能及防火环保要求;遮阳棚则通过物理遮挡减少太阳辐射对路基的直接加热,适用于低纬度高原强日照区。

2.2 柔性协调型路面结构与适应性材料的应用策略

鉴于冻土路基大变形的不可避免性,路面结构设计必须由传统的“刚性抵抗”转向“柔性协调”,通过提升结构的变形适应能力来延缓或避免开裂。首先,在基层选型上,优先采用级配碎石、水泥稳定碎石等柔性或半刚性基层替代整体性强但脆性大的二灰碎石等材料,或在基层与面层之间设置应力吸收层、土工格栅等过渡结构,以释放路基不均匀变形产生的附加应力,减少反射裂缝的产生。其次,在面层材料方面,广泛采用低温性能优异的改性沥青混合料,如 sbs/sbr 复合改性沥青、橡胶粉改性沥青或温拌沥青混合料,以提高材料的低温抗裂性、高温稳定性及抗疲劳性能。对于极寒或大变形路段,还可探索纤维增强沥青混合料、自愈合沥青材料或形状记忆聚合物等新型智能材料,赋予路面微损伤自修复能力,延长使用寿命。同时,面层厚度的设计应充分考虑预期冻融循环次数与路基变形量,适当增加上面层厚度以延缓裂缝贯通时间。在施工过程中,材料的温度控制尤为关键:沥青混合料的拌合、运输、摊铺及碾压温度需根据环境温度动态调整,避免在极端低温下施工导致压实不足或冷却过快产生温度裂缝;改性剂的添加必须均匀分散,防止离析影响性能一致性。实践证明,材料与结构的协同适配是抵御冻融损伤的关键防线,而精细化的施工工艺则是确保设计性能得以兑现的根本保障^[5]。

2.3 施工全过程热扰动精细化管控技术

再先进的设计理念与材料技术,若脱离精细化的施工管控,也难以在严酷的冻土环境中持久生效。施工阶段既是工程成型的关键期,也是对冻土扰动最剧烈的时期,必

须将“最小热扰动”原则贯穿始终。首先,科学安排施工时序,尽量将路基开挖、填筑等高风险工序安排在冷季进行,利用低温环境抑制冻土融化;确需在暖季作业时,应采取临时遮阳、喷雾降温、分段快速施工等措施,缩短冻土暴露时间。其次,优化施工组织与工艺,采用重型振动压路机分层碾压,确保压实度不低于 96%,以减少孔隙率与后期融沉潜力;对桥涵台背、管线沟槽、边坡接茬等易损部位,采用小型机具配合人工夯实,杜绝压实盲区;严格控制取弃土场位置,远离路线布设,避免人为改变地表热力边界与水文路径。

3 现存挑战与未来发展方向展望

尽管多年冻土区公路路面病害防治技术已取得显著进步,但在应对日益复杂的环境变化与更高的服务需求时,仍面临诸多深层次挑战,亟需在理论、技术与制度层面寻求突破。

3.1 气候非稳态下设计参数动态更新与风险预警机制缺失

现行设计规范所依据的气象与冻土参数多源于上世纪观测数据,难以反映当前及未来气候变暖情景下的真实状态。设计采用的冻土上限、地温梯度、含冰量等关键指标普遍偏于保守或滞后,导致部分工程“先天不足”。更为严峻的是,缺乏面向未来的动态风险评估与预警机制,无法对极端气候事件或突发冻土退化做出前瞻性响应。未来应建立覆盖主要冻土公路走廊的高分辨率地温-气象-路面性能一体化监测网络,结合气候模式预测与机器学习算法,构建冻土退化风险动态评估模型,实现从“静态经验设计”向“动态风险导向设计”的转变。同时,推动设计标准定期修订机制,将最新科研成果与实测数据及时纳入规范体系,提升设计的科学性与适应性^[6]。

3.2 智能化施工装备与韧性材料研发亟待突破

当前冻土区施工仍高度依赖人工经验与传统机械,自动化、智能化水平较低,难以实现热扰动控制的精准化与一致性。例如,压实度检测仍以点状抽检为主,无法实时反映全路段压实质量;地温监测数据未能与施工设备联动,调控滞后。未来应大力发展适配高寒环境的智能施工装备,如搭载红外测温与自动调平系统的摊铺机、具备压实度实时反馈的智能压路机、以及与地温监测联动的自适应遮阳系统等,实现施工过程的数字化、可视化与闭环控制。在材料方面,需加快研发兼具优异低温性能、抗紫外老化能力及自修复功能的新一代路面材料,探索生物基、低碳排放的绿色建材,兼顾工程性能与生态环境友好性。同时,

加强材料-结构-环境耦合耐久性试验平台建设,缩短新材料从实验室到工程应用的转化周期。

3.3 全生命周期绩效评价体系与多方协同治理机制缺位

目前对冻土区公路的评价仍偏重于建设期验收与短期养护指标,缺乏涵盖热稳定性、结构耐久性、生态影响及经济成本的全生命周期绩效评价体系。设计、施工、养护、科研等单位之间信息割裂,难以形成“监测-评估-反馈-优化”的良性循环。此外,冻土保护涉及交通、环保、气象、自然资源等多个部门,跨领域协同治理机制尚未健全,导致政策碎片化、资源分散化。

4 结语

多年冻土区公路路面病害防治是一项融合了地球科学、土木工程与管理科学的复杂系统工程,其本质是在动态变化的自然环境中寻求人类工程活动的可持续边界。我们已走过依靠经验硬扛、事后被动修补的初级阶段,也必须清醒认识到在气候剧变与工程扩张双重压力下,既有知识体系与技术手段正面临深刻重构的紧迫现实。真正的防治之道,不在于追求一劳永逸的“完美路面”,而在于构建一个能够感知冻土呼吸、适应环境脉动、在扰动中自我调适的韧性交通系统。这要求工程师放下征服自然的傲慢,学会倾听地温的低语、理解冰水的节律、尊重时间的尺度;施工者超越进度与成本的单一标尺,将每一铲土、每一次碾压都视为与冻土的协商而非对抗;管理者打破阶段与部门的壁垒,让数据真正驱动决策、让反馈切实引导改进。未来,随着人工智能、新材料、碳中和目标的深度融合,多年冻土区公路或将迎来从“对抗冻土”到“共生冻土”的范式革命。但无论技术如何演进,对自然规律的谦卑、对细节的执着、对长远责任的担当,始终是寒区工程不可动摇的基石。这条通往安全与耐久的道路没有终点,但每一步基于实证的审慎前行,都是对边疆稳定最坚实的守护,对人类在极端环境中可持续生存最深刻的诠释。

参考文献:

- [1] 刘鑫, 栾尧正, 张力杰等. 青藏工程走廊原状冻土试样融沉系数试验研究[J]. 冰川冻土, 2026, 48(2): 419-428.
- [2] 刘肝, 毛自强. 复杂地质条件下公路工程路基施工技术研究[C]// 江西省汽车工程学会. 工程技术创新发展学术研讨会论文集(第一册). [出版者不详], 2026: 743-746. DOI:10.26914/c.cnkihy.2026.011413.
- [3] 王贝贝, 张猛, 谢阳阳. 多年冻土地区路基保温施工控制技术应用[J]. 黑龙江交通科技, 2026, 49(1): 8-12+17.

DOI:10.16402/j.cnki.issn1008-3383.2026.01.004.

[4] 许智博, 冷冰. 高寒林区多年冻土路基温度场监测与分析[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(29): 93-96.DOI:10.19981/j.CN23-1581/G3.2025.29.023.

[5] 胡田飞, 崔灿增, 岳祖润等. 多年冻土区路基热融

病害防控技术综述[J]. 中国铁道科学, 2025, 46(2): 1-17.

[6] 谷新贺. 高寒高海拔多年冻土地区公路路基和路面的病害及其防治[J]. 四川水泥, 2024(6): 213-215.DOI:10.20198/j.cnki.scsn.2024.06.072.