

# 寒冷地区公路路面结构抗冻设计关键技术研究

王 强

新疆交通规划勘察设计研究院有限公司 新疆 乌鲁木齐 830006

**【摘 要】**：寒冷地区低温冻融环境会持续损伤公路路面结构，引发开裂、沉陷、翻浆等各类病害，显著降低公路通行安全性与使用寿命，科学的抗冻结构设计是保障寒区公路稳定运营的核心。本文聚焦寒区路面冻害核心机理，结合寒区气候、地质及路面运营特征，梳理路面结构抗冻设计的核心难点与现有不足，针对性探究适配寒区环境的路面结构选材、层级布局、防护加固等关键技术。构建规范、系统的路面抗冻设计思路与技术体系，规避传统设计模式的局限性，提升寒区公路路面抵御冻融灾害的能力，为寒区公路工程长效建设与运维提供可靠技术支撑。

**【关键词】**：寒冷地区；公路路面；结构设计；抗冻技术；路面病害

DOI:10.12417/2705-0998.26.13.047

## 引言

高纬度、高海拔寒冷地区常年处于低温、积雪、冻融交替的特殊环境，特殊的气候与地质条件对公路路面结构稳定性提出严苛考验。路面土体反复冻融融化易产生体积变形，持续破坏路面结构整体性，长期运营后会产生各类不可逆病害，大幅增加公路养护成本，制约区域交通路网的稳定运行与发展。现阶段多数公路路面设计体系未充分适配寒区极端环境特征，常规结构设计方案抗冻适配性不足，难以长效抵御冻融损伤。基于寒区公路路面病害发育规律与结构受力特点，优化抗冻核心技术，优化路面结构设计体系，可从源头遏制冻害滋生，强化寒区公路工程建设质量，具备重要的工程应用价值。

## 1 寒冷地区公路路面结构典型冻害及现存问题

### 1.1 低温冻融引发的路面结构性破坏类型

寒冷地区昼夜温差与季节温差幅度较大，土层与路面结构层长期处于反复冻融循环状态，会催生多种类型的结构性破坏。路面表层在低温收缩作用下易产生网状细纹与横向裂缝，低温环境下路面材料韧性显著降低，外部车辆荷载叠加温度应力作用，会促使细微裂缝持续扩张延伸，形成贯通性裂缝。路基土体冻结过程中水分聚集结冰产生冻胀力，会顶推路面结构造成局部隆起、变形，破坏路面平整度。气温回升解冻后，路基冻土融化出现土体软化、沉降现象，路面结构失去均匀支撑，进而出现沉陷、坑槽等病害。长期冻融交替还会造成路面结构层松散剥落，面层与基层粘结性能衰减，逐步出现层间脱空、推移破坏，彻底破坏路面结构整体性。

### 1.2 寒区路面结构抗冻设计现存短板

寒区公路路面工程建设中，传统结构设计体系存在诸多适配性短板。部分路面结构设计未充分考量区域冻土分布、冻融周期等地域特征，结构层级布局沿用常规地区设计标准，未针对寒区低温环境优化结构厚度与层级配比<sup>[1]</sup>。结构选材环节缺乏针对性，部分常规路面材料低温稳定性、抗冻耐久性较差，无法适配长期冻融循环工况，易出现材料老化、性能衰减问题。

路面防水、隔水结构设计不完善，地表水与地下水持续渗入结构层内部，加剧土体冻胀融沉效应，加速路面病害发育。同时，抗冻设计多聚焦路面表层防护，忽视路基、垫层等下层结构的抗冻协同设计，整体抗冻体系完整性不足。

### 1.3 冻害对寒区公路通行运营的负面影响

各类路面冻害问题会对寒区公路运营产生多重不利影响，路面裂缝、沉陷、坑槽等病害会直接破坏路面平整度，车辆行驶过程中易出现颠簸、打滑现象，大幅降低行车舒适性与通行安全性，极易引发道路交通安全隐患。路面结构性破坏会改变路面受力分布，车辆荷载作用下病害会持续快速恶化，缩短公路整体服役周期，大幅提升公路日常养护、维修、翻新的经济成本。频繁的路面病害处置作业会造成路段通行受限、交通拥堵，影响区域路网通行效率，制约当地交通运输、物资输送等基础产业发展。持续性的路面结构损伤还会降低公路工程建设质量，影响寒区交通基础设施长效稳定运行。

## 2 寒冷地区公路路面冻害形成核心机理分析

### 2.1 低温环境下路面材料性能衰变机理

低温环境会持续改变公路路面各类原材料的物理力学性能，诱发材料耐久性衰变。沥青类路面材料在低温条件下硬度提升、韧性大幅下降，温度骤变产生的温度应力会超过材料抗拉极限时，就会引发开裂破坏。水泥类路面材料长期处于冻融环境，内部孔隙水分反复冻结膨胀、融化收缩，会逐步扩大孔隙结构，造成材料疏松、强度衰减，抗渗性与结构稳定性持续下降。基层、垫层所用的无机结合料稳定材料，在低温冻融循环作用下，内部粘结结构易发生破坏，材料整体性受损，承载能力逐步降低。各类路面材料的低温性能衰变，是路面结构出现破坏、病害持续发展的核心内因，直接决定路面整体抗冻性能。

### 2.2 路基土体冻胀融沉结构变形机理

寒区路基土体的冻胀融沉效应是破坏路面结构的核心诱因。路基土体内部含有大量孔隙水分，低温环境下水分冻结形

成冰晶, 体积膨胀产生冻胀应力, 促使路基土体整体隆起变形, 向上挤压路面结构层, 造成路面翘曲、开裂。土体冻结过程中, 周边未冻结区域水分会持续向冻结层迁移聚集, 进一步扩大冻胀变形范围与变形幅度<sup>[2]</sup>。气温回升后, 冻土冰晶快速融化, 土体含水率骤增、孔隙增大, 土体强度大幅降低, 在自重应力与路面荷载作用下产生不均匀沉降。反复的冻胀与融沉循环, 会让路基与路面结构长期处于交变受力状态, 逐步破坏结构稳定性, 引发各类不可逆结构性病害。

### 2.3 水热耦合作用加剧路面冻害发展机理

寒区公路路面结构内部的水热耦合作用, 是加速冻害发育、扩大病害范围的关键因素。寒区积雪消融、降雨渗透会形成大量地表水, 通过路面裂缝、孔隙渗入结构层内部, 地下水也会通过毛细作用上升至路基与路面结构层。低温环境下, 结构层内部积水持续冻结, 改变结构层原有热力分布, 形成局部低温冻损区域。水分迁移与热量交换同步进行, 结构层不同区域冻融速率、变形程度存在差异, 产生不均匀结构应力, 加剧路面裂缝扩张与层间脱离。水热耦合的持续循环, 会不断侵蚀路面结构粘结层与路基土体, 弱化结构承载性能, 让轻微病害逐步发展为大面积结构性破坏。

## 3 寒冷地区公路路面结构抗冻设计核心原则

### 3.1 地域适配性与因地制宜设计原则

寒区公路路面抗冻结构设计需严格遵循地域适配性原则, 贴合不同寒区的气候、地质、冻土特征开展差异化设计。高海拔寒区低温持续时间长、昼夜温差极大, 冻土深度较深, 路面结构设计需重点强化深层抗冻防护与低温稳定性。高纬度寒区积雪量大、融冻周期长, 地下水含量丰富, 设计过程中需侧重防水隔水与抗融沉结构布局。针对多年冻土、季节性冻土等不同冻土类型, 差异化设定结构埋深、层级厚度, 规避冻土活动层变形对路面结构的破坏。结合区域降水、积雪、低温极值等气候参数, 优化结构设计方案, 杜绝通用化设计带来的适配性不足问题, 保障设计方案贴合地域环境特征。

### 3.2 结构整体性与协同抗冻设计原则

路面结构抗冻设计需坚守整体性理念, 实现面层、基层、垫层、路基的协同抗冻防护。单一结构层的抗冻优化无法彻底规避冻害问题, 需统筹各结构层的受力特征与抗冻需求, 构建多层次协同防护体系<sup>[3]</sup>。优化各结构层之间的粘结性能与应力传递效率, 避免层间脱离、局部应力集中引发的结构破坏。根据各结构层的服役环境, 差异化配置抗冻性能, 表层侧重抵御低温开裂、表层剥落, 中层侧重分散荷载、缓冲冻胀应力, 底层与路基侧重隔水防渗、抵御土体变形。通过各结构层的功能互补、性能协同, 提升路面整体抗冻能力, 保障结构体系长期稳定。

### 3.3 耐久性与长效服役设计原则

寒区路面结构抗冻设计需兼顾短期防护效果与长期服役耐久性, 满足公路长效运营需求。结构设计过程中充分考量长期冻融循环、车辆荷载、自然风化等多重耦合作用, 选用低温稳定性强、抗冻耐久性优、抗疲劳性能好的路面材料, 从源头提升结构抗损能力。合理优化结构厚度、层级配比与防护构造, 降低长期环境侵蚀与荷载作用带来的结构性能衰减速度。摒弃重建设、轻防护的设计理念, 在结构设计中预留长效防护空间, 适配寒区常年恶劣的运营环境, 减少后期病害频发问题, 延长路面整体服役年限, 降低长期运维成本。

## 4 寒冷地区公路路面结构抗冻关键技术优化

### 4.1 路面抗冻功能性材料优选与改良技术

适配寒区环境的路面材料选型与改良是提升抗冻性能的基础技术。沥青路面可选用低温延度高、温度稳定性好的改性沥青材料, 通过掺加抗冻改性助剂, 优化沥青混合料的低温韧性, 降低低温收缩开裂风险。水泥混凝土路面可优化配合比设计, 掺入引气剂、抗冻外加剂, 细化材料内部孔隙结构, 减少积水冻结带来的结构损伤, 提升混凝土抗冻耐久性。基层与垫层材料优先选用级配优良、稳定性强的无机结合料, 改良土体颗粒配比, 降低土体含水率与冻胀敏感性。针对特殊寒区工况, 可复合选用新型抗冻复合材料, 强化结构层整体抗冻、防渗、抗变形能力, 适配长期冻融循环环境。

### 4.2 路面多层级抗冻结构布局优化技术

依托寒区冻害机理, 优化路面多层级结构布局, 构建梯度抗冻防护体系。合理调整路面各结构层厚度, 根据区域最大冻土深度, 确定垫层与路基防护层厚度, 阻断深层冻土变形向上传导。优化结构层级搭配, 采用柔性面层搭配刚性基层的组合形式, 缓冲低温应力与冻胀变形带来的结构损伤<sup>[4]</sup>。增设专用抗冻垫层与隔水层, 阻隔地表水与地下水渗透, 减少结构层水分聚集, 从根源降低冻胀融沉风险。调整各结构层模量配比, 实现应力均匀分散, 避免局部应力集中引发的结构破坏, 让路面结构可自适应寒区冻融变形, 提升整体结构稳定性与抗冻能力。

### 4.3 路面辅助抗冻防护加固关键技术

配套辅助防护加固技术可进一步强化路面结构抗冻效果, 弥补主体结构设计短板。路面表层可采用封层、罩面防护技术, 封闭路面表层孔隙与细微裂缝, 阻断水分渗入, 抵御低温风化与冻融侵蚀。层间增设粘结防水夹层, 提升层间粘结强度的同时, 实现整体隔水防渗, 杜绝层间积水冻损。路基侧边设置排水、截水构造, 完善路面整体排水体系, 快速疏导地表积水与地下水, 降低土体含水率。针对冻土活跃路段, 可采用路基保温隔热加固技术, 铺设保温隔热材料, 弱化低温对路基土体的冻结作用, 减小冻土冻胀融沉变形幅度, 全方位提升路面结构

抗冻防护效能。

## 5 寒冷地区公路抗冻路面设计应用与质量管控

### 5.1 抗冻路面结构设计方案工程适配应用

寒区公路路面抗冻设计方案需结合工程实际工况完成适配落地应用,针对不同等级、不同区位的寒区公路差异化调整设计体系。干线公路交通荷载大、运营频次高,需采用高标准多层次抗冻结构体系,强化材料性能与结构厚度,提升重载工况下的抗冻稳定性。乡村支线公路荷载较小、运维条件有限,可简化结构层级,选用经济型抗冻材料与简易防护构造,兼顾抗冻性能与工程成本。针对冻土退化、积雪严重、温差极大等特殊路段,针对性叠加专项抗冻技术,形成个性化设计方案,确保各类寒区路段的路面结构均可有效抵御冻融灾害,保障工程建设适配性与实用性。

### 5.2 路面抗冻工程施工过程质量管控要点

规范的施工质量管控是保障抗冻设计技术落地成效的关键。施工前期需精准勘察区域气候、冻土、水文条件,细化施工方案,规避低温、雨雪等恶劣天气对施工质量的影响。材料进场阶段严格核查各类抗冻材料的性能指标,杜绝不合格材料投入施工,保障原材料抗冻性能达标<sup>[5]</sup>。结构层施工过程中,精准把控层级厚度、配合比、压实度等核心参数,保障各结构层施工均匀性与整体性,避免施工缺陷引发的后期冻害。强化层间施工管控,保障层间粘结紧密、无空隙,同步做好排水、隔水、保温防护构造的施工验收,全方位把控施工质量,夯实

路面抗冻基础。

### 5.3 抗冻路面后期运维病害防控管理

长效的运维管理可有效延缓抗冻路面性能衰减,延长工程整体服役寿命。结合寒冷地区季节性冻融变化规律,建立规范化、常态化的路面巡检机制,重点排查低温冻融周期内路面出现的细微裂缝、结构渗水、局部变形等初期病害,及时开展精细化微破损修复,从源头杜绝病害持续扩散升级。依据冬夏季环境差异开展针对性养护作业,冬季落实路面防冻防护与积雪清理工作,缩减冻融侵蚀作用时长,融雪季节全面疏通路面排水系统,阻断水分下渗通道。定期检测路面结构整体性能与材料耐久程度,对性能弱化区域及时加固补强,完善全周期运维管控体系,持续稳定保障寒区公路路面抗冻能力与通行安全。

## 6 结语

本文系统梳理寒冷地区公路路面冻害类型与运营危害,深入剖析低温、冻胀、水热耦合作用下的路面冻害核心机理,明确寒区路面抗冻设计的核心短板。结合寒区工程环境特征,确立地域适配、结构协同、耐久服役的抗冻设计核心原则,从材料改良、结构布局、防护加固多维度优化抗冻关键技术,配套完善工程应用与施工运维管控体系。相关技术思路可有效解决寒区路面抗冻适配性不足、病害频发等问题,全面提升寒区公路路面结构抗冻性能与服役稳定性,为寒区公路抗冻工程标准化、精细化建设提供科学参考,助力寒区交通基础设施高质量发展。

## 参考文献:

- [1] 冉成海,陈子昊,张国斌.寒冷地区公路服务区太阳能集热器耦合超低温型热泵供暖设计及运行能效分析[J].资源节约与环保,2026,(1):1-6.
- [2] 何敏,尹军,李浦瑜,等.颗粒包覆缓释型抗凝冰材料在寒冷地区公路的应用[J].城市道桥与防洪,2025,(12):319-324.
- [3] 刘旭强.寒冷地区公路路基冻胀问题及解决方案[J].交通世界,2025,(23):41-43.
- [4] 李志新.寒冷地区公路沥青路面全生命周期养护技术研究[J].工程机械与维修,2025,(7):44-46.
- [5] 徐忠慧.寒冷地区公路路面抗冻胀技术的应用与效果评估[J].汽车周刊,2025,(6):126-128.