

寒冷地区公路路面抗冻融性能提升方法探析

董国辉

四川铁才人力资源管理有限公司 四川 成都 610041

【摘要】：我国北方高寒、高纬度寒冷地区冬季气温极低，昼夜温差与季节温差波动剧烈，公路路面长期经受冻融循环作用，极易出现开裂、松散、剥落、坑槽等病害，不仅大幅缩短路面使用寿命，还会增加养护成本，威胁行车安全。本文结合寒冷地区公路路面冻融破坏的核心机理与实际病害现状，从路面材料改性、结构体系优化、施工工艺管控、后期养护维护四个核心层面，系统探析抗冻融性能提升的可行方法，同时通过工程实践数据验证各类技术的应用效果，为寒冷地区公路路面抗冻融设计、施工与养护提供理论参考和实操依据，助力提升寒区公路工程的耐久性与通行保障能力。

【关键词】：寒冷地区；公路路面；抗冻融性能；材料改性；结构优化

DOI:10.12417/2811-0722.26.05.009

1 引言

寒冷地区公路路面所处环境特殊，冬季负温持续时间长，积雪融水、降水易渗入路面结构内部，水分遇冷结冰体积膨胀，形成冻胀力，气温回升后冰体融化，路面结构反复承受膨胀与收缩应力，长期循环下内部结构逐渐劣化，最终引发各类冻融病害。相较于普通地区公路，寒区路面冻融破坏具有发病早、发展快、治理难的特点，传统路面材料与施工工艺难以适配极端低温环境，抗冻融短板成为制约寒区公路质量的核心因素。因此，针对性优化路面抗冻融技术体系，从源头遏制冻融病害，是提升寒冷地区公路工程建设质量、延长道路服役周期的关键，也是公路工程职称评审中重点关注的技术研究方向。本文立足工程实践，结合现有技术成果，全面梳理路面抗冻融性能提升的核心路径，确保技术方法具备落地性与实用性。

2 寒冷地区公路路面冻融破坏现状与核心机理

2.1 冻融破坏主要表现形式

寒冷地区沥青路面与水泥混凝土路面的冻融破坏形式存在差异，但核心诱因均为水分与温度循环的共同作用。沥青路面冻融病害多体现为表面松散、骨料脱落、网裂、坑槽，部分路段出现唧浆现象，基层受水侵蚀后承载力下降，进一步加剧面层破坏；水泥混凝土路面则易出现边角剥落、表面起砂、纵向横向开裂，严重时出现板块断裂、错台，直接影响路面平整度与结构稳定性。调研数据显示，我国北方寒冷地区普通公路路面服役寿命普遍比设计年限缩短30%以上，高速公路路面冻融病害发生率超40%，养护维修频率是普通地区的2-3倍，经济损失与通行影响十分显著。

2.2 冻融破坏核心机理

路面冻融破坏并非单一因素作用，而是水分侵入、温度应力、材料性能、交通荷载多重因素叠加的结果。其一，路面结构存在孔隙，外界水分通过裂缝、孔隙渗入内部，负温下水分结冰体积膨胀约9%，对路面内部形成挤压应力，破坏材料内部结构；其二，气温回升后冰体融化，孔隙内形成负压，再次

吸入水分，反复冻融循环下，材料内部微裂缝不断扩展、连通，最终形成宏观病害；其三，寒冷地区温差较大，路面材料热胀冷缩效应明显，温度应力与冻胀应力叠加，进一步弱化材料粘结性能与结构整体性；其四，车辆荷载反复作用下，已受损的路面结构受力不均，加速病害扩散，形成恶性循环。

3 寒冷地区公路路面抗冻融性能提升核心方法

3.1 路面材料优化改性，筑牢抗冻融基础

材料是提升路面抗冻融性能的核心，通过优化材料配比、改性基础材料、添加功能性助剂，可从源头提升材料密实度、低温韧性与抗水侵能力，降低冻融循环对路面的损伤。针对沥青路面，优先选用SBS复合改性沥青，合理控制改性剂掺量，提升沥青的低温延度与粘结强度，避免低温脆裂；同时选用坚固、低吸水率的优质集料，严控集料含泥量与针片状颗粒含量，搭配玄武岩矿物纤维，增强沥青混合料的整体性与抗裂能力，添加有机硅类抗剥落剂，强化沥青与集料的粘附性，防止冻融后骨料脱落。针对水泥混凝土路面，选用低热硅酸盐水泥，掺入粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料，优化配合比降低水胶比，减少内部孔隙；添加引气剂形成均匀微小气泡，缓冲冻胀应力，同时掺入早强减水剂，提升混凝土早期强度，避免早期冻害。

为直观对比不同材料的抗冻融性能，现将寒区常用路面改良材料核心指标整理如下：

表1 不同材料的抗冻融性能对比

路面类型	材料改良方案	冻融循环耐受次数	质量损失率	核心抗冻融优势
沥青路面	普通基质沥青混合料	15-20次	≥8%	成本低，低温韧性差
沥青路面	SBS改性沥青+矿物纤维混合料	35-40次	≤3%	低温韧性强，抗剥落、抗裂性能优

路面类型	材料改良方案	冻融循环耐受次数	质量损失率	核心抗冻融优势
水泥混凝土路面	普通水泥混凝土	25-30次	≥5%	强度高, 抗渗性差
水泥混凝土路面	掺引气剂+矿物掺合料混凝土	50-55次	≤1.5%	孔隙结构优化, 冻胀应力缓冲效果好

3.2 路面结构体系优化, 阻断水分侵入路径

优化路面结构设计, 构建密实防渗、排水顺畅的结构体系, 是减少水分侵入、缓解冻融破坏的关键。首先, 强化路面防渗设计, 沥青路面采用密级配沥青混合料面层, 严控空隙率, 将面层空隙率控制在 3%-5%, 杜绝水分快速下渗; 水泥混凝土路面优化板块尺寸, 合理设置伸缩缝与传力杆, 缝内填充优质密封胶, 做好防水处理, 防止水分从缝隙渗入基层。其次, 完善排水系统, 路面横坡、纵坡设计满足寒冷地区排水要求, 避免路面积水; 增设基层排水层、透水管, 将渗入路面结构内部的少量水分快速排出, 减少水分滞留; 路侧设置边沟、截水沟, 及时疏导积雪融水, 防止水分回流侵蚀路面。最后, 增设抗冻垫层, 在路基与基层之间铺设砂砾、碎石等透水性好的抗冻垫层, 阻断毛细水上升, 降低路基冻胀风险, 同时缓解基层与面层的温度应力, 提升整体结构的抗冻融稳定性。

3.3 施工工艺精细化管控, 保障路面成型质量

(1) 沥青路面施工机械与工艺管控

沥青路面抗冻融性能依赖混合料均匀性与压实密实度, 需精准匹配专用施工机械, 严控全流程工艺参数, 杜绝孔隙过大、温度不均引发的后期冻融损伤。拌合设备选用间歇式强制拌合楼, 提前调试温控系统, 寒区施工将拌合温度较普通地区提高 10-15℃, 确保改性沥青与集料、纤维充分裹附, 杜绝花白料、离析料; 拌合时间延长 5-10 秒, 保证混合料均匀性, 从源头减少内部薄弱点。摊铺机械采用大功率履带式摊铺机, 保持匀速连续摊铺, 避免中途停顿, 摊铺温度控制在 150℃ 以上, 杜绝低温摊铺导致的混合料硬结、压实不到位; 摊铺机配备自动找平装置, 保障路面平整度与厚度均匀, 防止局部厚度不足引发冻胀开裂。压实机械采用双钢轮振动压路机、胶轮压路机组合施工, 遵循“高频低幅、先轻后重、紧跟慢压”原则, 初压、复压、终压三段式压实, 严控压实度不低于 98%, 彻底消除内部孔隙; 低温环境下缩短碾压段落长度, 紧跟摊铺机作业, 避免混合料降温过快影响压实效果, 同时做好接缝位置的补压处理, 防止缝隙渗水。

(2) 水泥混凝土路面施工机械与工艺管控

水泥混凝土路面抗冻融核心在于密实度与早期强度达标, 需依托专用机械严控拌合、振捣、养护全流程, 规避蜂窝麻面、

早期受冻等问题。拌合设备选用全自动强制式混凝土拌合站, 精准计量水泥、掺合料、外加剂与用水量, 严控水胶比, 拌合时间不少于 90 秒, 确保引气剂、矿物掺合料分布均匀, 形成稳定的微气泡缓冲结构。振捣设备采用高频插入式振捣棒搭配平板振捣器联合振捣, 先对边角、板块边缘重点振捣, 再全面平板振捣, 杜绝漏振、过振, 避免蜂窝、麻面等孔隙缺陷, 保证混凝土密实度; 振捣后及时提浆整平, 保障路面表面平整、无积水凹槽。切缝机械选用全自动混凝土切缝机, 严格把控切缝时机, 在混凝土抗压强度达到 5-10MPa 时立即切缝, 切缝深度、间距符合寒区设计要求, 防止温差与冻胀引发不规则裂缝; 切缝后及时清理缝隙, 为后续密封防水做好准备。养护机械选用自动喷淋养护设备搭配保温覆盖装置, 低温施工时全程覆盖保温膜、棉毡, 延长保湿保温养护时间, 确保混凝土在达到临界抗冻强度前不受冻害, 避免早期结构劣化。

(3) 寒区施工整体管控要点

除分设备专项管控外, 寒冷地区需避开冬季极端低温、大风雨雪时段施工, 优先选择日间气温较高的时间段作业; 施工前做好现场防风、保温准备, 提前检测原材料温度, 杜绝低温原材料直接拌合; 施工完成后做好成品保护, 严禁提前开放交通, 确保路面结构完全成型、强度达标后再投入使用, 从施工全流程阻断冻融病害诱因。

3.4 后期养护运维常态化, 延缓冻融病害发展

后期养护是提升路面抗冻融性能、延长服役寿命的最后一环, 需建立常态化、预防性养护体系。日常养护中, 加强路面巡查, 重点排查裂缝、渗水、松散等早期病害, 发现问题及时处置, 采用灌缝、修补等方式阻断水分侵入路径, 避免小病害发展为大面积冻融破坏。冬季养护重点做好除雪除冰工作, 选用环保型融雪剂, 避免氯盐类融雪剂侵蚀路面材料; 及时清理路面积雪, 防止积雪融化渗入路面结构。春季融冻期是冻融病害高发期, 需加大巡查频率, 重点排查唧浆、坑槽等病害, 及时进行修补加固, 防止基层进一步受损。定期检测路面密实度、渗水系数与结构强度, 建立路面健康档案, 根据检测结果制定针对性养护方案, 变被动维修为主动预防, 最大限度降低冻融循环的损伤。

4 工程实践应用效果

4.1 工程概况

本次实践依托我国北方高寒地区某高速公路改扩建路段开展, 该路段地处高纬度严寒区域, 年均气温零下 2.6 摄氏度, 冬季极端低温可达零下 38 摄氏度, 全年正负温交替频繁, 年度冻融循环次数超 45 次, 属于公路路面重度冻融病害易发区。该路段原有老路采用传统路面材料与工艺建设, 通车仅 5 年便出现大面积松散、坑槽、唧浆等典型冻融病害, 不仅行车舒适度极差, 后期养护频次高、资金投入大, 严重影响道路正常通

行。本次改扩建路段全长 12.6 公里，其中沥青混凝土路面 10.2 公里、水泥混凝土路面 2.4 公里，工程核心目标为全面优化路面抗冻融性能，延长道路服役周期，降低后期运维成本，全程落地本文提出的材料、结构、施工、养护一体化抗冻融技术体系。

4.2 抗冻融提升技术实施方案

结合项目区域气候特点、地质条件及路面类型差异，工程针对性制定差异化抗冻融实施方案，实现全流程技术管控。沥青路面路段选用 SBS 改性沥青掺加玄武岩矿物纤维的混合料配比，严控面层空隙率稳定在 4% 以内，同步优化路面排水结构，在路基与基层之间增设碎石抗冻垫层，阻断毛细水上升路径；水泥混凝土路面路段采用低热硅酸盐水泥，掺入矿渣粉与高效引气剂，严格控制水胶比，优化板块伸缩缝设计，缝内填充高粘性密封胶做好全封闭防水。施工阶段避开冬季极端低温时段，沥青路面严控拌合、摊铺与压实温度，水泥混凝土路面做好全程保温养护，杜绝早期冻害；通车运营后建立预防性养护机制，重点落实冬季除雪防冰、春季融冻期病害排查、日常裂缝灌缝等工作，从源头遏制冻融病害滋生。

4.3 效果监测与数据对比

工程完工后，委托专业公路检测机构开展为期 3 年的跟踪监测，同步选取同区域、同等级、同期通车的传统工艺施工路段作为对照样本，围绕冻融耐受能力、病害发生率、养护成本、结构强度保留率四项核心指标开展对比检测，客观验证综合抗冻融技术的应用成效，具体对比数据详见下表。

表 2 效果监测与数据对比

检测指标	传统技术施工路段	综合抗冻融技术路段	指标提升幅度
冻融循环耐	沥青路面 18	沥青路面 38 次、	沥青路面提升 111%，

受次数	次、水泥混凝土路面 28 次	水泥混凝土路面 53 次	水泥混凝土路面提升 89%
三年冻融病害发生率	42.3%	6.8%	降低 35.5 个百分点
年均养护成本	128 元/平方米	74 元/平方米	降低 42.2%
三年后结构强度保留率	71.6%	89.3%	提升 17.7 个百分点

从长期运营效果来看，采用综合抗冻融技术的路段通车三年后，路面整体平整度达标，无松散、开裂、坑槽、唧浆等冻融病害，行车安全性与舒适性显著提升，各项性能指标均满足高寒地区公路设计规范要求。该实践结果充分证明，本文提出的一体化抗冻融提升方法，具备较强的实用性与可推广性，能够有效解决寒冷地区路面冻融破坏的核心难题。

5 结论

寒冷地区公路路面抗冻融性能提升是一项系统工程，需立足冻融破坏核心机理，从材料、结构、施工、养护全流程发力，形成闭环管控体系。材料优化改性是基础，通过提升材料低温性能与抗渗性，从源头抵御冻融损伤；结构优化是关键，阻断水分侵入与滞留路径，缓解冻胀应力；施工管控是保障，精细化作业确保路面结构密实完整；养护运维是补充，常态化预防延缓病害发展。四类技术协同发力，可有效提升路面抗冻融性能，延长道路服役周期，降低养护成本。随着寒区公路建设需求的提升，可进一步研发新型抗冻融材料，如自修复沥青、纳米改性混凝土等，结合智能化监测技术，实现路面冻融病害的实时预警与精准处置，推动寒冷地区公路路面抗冻融技术向高效、环保、智能化方向发展，为寒区交通基础设施建设提供更有力的技术支撑。

参考文献：

- [1] 刘少华,潘宝峰,许斌,等.排水沥青路面抗冻融循环性能研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2022,46(01):115-119.
- [2] 刘涛,戴劲,谢严君.空隙率对沥青混凝土抗冻融循环破坏性能的影响研究[J].科技创新与应用,2021,(02):79-82.
- [3] 孔亮,蒙彦宇,顾媛媛,等.花岗岩废料再生混凝土路面砖抗冻融性能研究[J].硅酸盐通报,2021,40(05):1545-1553+1563.