

# 冬季低温环境对道路养护施工质量的影响 及应对措施分析

谢家书

曲靖市马龙区地方公路管理段, 云南 曲靖 655199

DOI:10.61369/ERA.2026030028

**摘要 :** 道路养护施工是保障公路安全、耐久与服务水平的关键, 其质量关乎国计民生。冬季低温环境是制约养护质量的严峻挑战, 它严重影响沥青、水泥等材料的性能与施工和易性, 并对工艺控制、层间粘结及路面长期耐久性产生显著负面影响, 增加质量风险与全寿命成本。本文系统分析低温对材料、工艺及结构质量的作用机理, 结合地方公路管理段养护职责与“曲靖三宝至昆明清水高速公路(以下简称“三清高速公路”)”损毁修复案例, 探讨涵盖材料优选改性、工艺优化创新、动态监测与质量管理的综合应对措施体系, 以期为基层养护部门冬季科学施工提供理论参考与实践指导, 提升公路网络在极端气候下的服役性能与韧性。

**关键词 :** 冬季低温; 道路养护; 施工质量; 沥青混合料; 温控工艺

## Analysis of the Impact of Winter Low Temperature Environment on Road Maintenance Construction Quality and Countermeasures

Xie Jiashu

Qujing City Malong District Local Highway Management Section, Qujing, Yunnan 655199

**Abstract :** Road maintenance construction is the key to ensuring the safety, durability, and service level of highways, and its quality is related to the national economy and people's livelihood. The low temperature environment in winter is a severe challenge that restricts the quality of maintenance. It seriously affects the performance, construction, and ease of use of materials such as asphalt and cement, and has a significant negative impact on process control, interlayer bonding, and long-term durability of road surfaces, increasing quality risks and total life cycle costs. This article systematically analyzes the mechanism of low temperature on materials, processes, and structural quality, and combines the maintenance responsibilities of local highway management sections with the case of damage and repair of the "Qujing Sanbao Kunming Qingshui Expressway" (hereinafter referred to as the "Sanqing Expressway") to explore a comprehensive response measures system covering material optimization and modification, process optimization and innovation, dynamic monitoring, and quality management. The aim is to provide theoretical reference and practical guidance for winter scientific construction of grassroots maintenance departments, and improve the service performance and resilience of the highway network in extreme weather conditions.

**Keywords :** low temperature in winter; road maintenance; construction quality; asphalt mixture; temperature control process

### 引言

公路交通动脉的良好状况依赖周期性、预防性与修复性养护工程。养护施工面临复杂条件、紧迫工期及严格保通要求, 其中季节性低温是影响施工质量的关键变量。我国大部分地区冬季显著, 此时进行路面养护, 常因材料性能劣化、工艺适应性降低, 导致压实不足、粘结不良、早期病害频发, 甚至工程失效, 威胁公路安全与效率<sup>[1]</sup>。这一矛盾在基层养护单位及类似“三清高速”损毁道路集中修复中尤为突出, 后者常因保通压力不得不在低温季施工, 加剧了质量风险。因此, 系统研究冬季低温影响机理, 探索有效应对措施, 对提升养护水平、保障投资效益具有重要意义。

## 一、冬季低温环境对道路养护施工质量的影响机理分析

### （一）对筑路材料性能的直接影响

筑路材料，尤其是沥青混合料与水泥混凝土，其性能具有显著的温度敏感性。在冬季低温条件下，沥青的粘弹性发生根本变化，其粘度急剧增大，流动性、柔韧性显著降低，从粘弹态向近似玻璃态转变。这使得沥青混合料在拌和、运输、摊铺过程中，沥青难以充分裹覆集料，易出现花白料，且混合料变得干涩、坚硬，施工和易性急剧恶化<sup>[9]</sup>。对于水泥混凝土材料，低温会严重延缓水泥水化反应的速率，甚至使其接近停止。这不仅导致混凝土早期强度发展极其缓慢，无法及时形成承载能力，而且由于水化不充分，会影响混凝土的最终强度及耐久性。此外，新拌混凝土中的自由水在低温下易发生冻结，体积膨胀约9%，会在混凝土内部产生巨大的结晶压力，破坏尚未稳固的水泥石结构，导致微观裂缝的产生，这种早期冻害对混凝土的长期性能是毁灭性的。

### （二）对关键施工工艺的制约效应

低温环境严重制约养护施工核心工艺。先是沥青混合料压实工艺，其效果高度依赖混合料温度。低温下混合料冷却加快，有效压实时间窗口大幅缩短。一旦温度低于临界值，沥青粘聚力与集料摩阻力剧增，导致压实不足，进而引发路面孔隙率增大、渗水、松散和抗疲劳性能下降。之后是层间粘结工艺，低温延缓乳化沥青破乳与凝结，也使热沥青迅速冷却、粘度上升，造成渗透与粘结效果差，易在行车荷载下引发表面病害<sup>[9]</sup>。最后，对于水泥混凝土路面，低温影响浇筑与振捣均匀性，并使常规洒水养生易结冰，若保温措施不足，将严重影响强度发展及开放交通时效。

### （三）对成型结构长期耐久性的潜在危害

由低温施工引发的材料性能劣化和工艺缺陷，最终会传导并固化为路面结构的“先天不足”，对其长期耐久性构成深远危害。压实不足的路面，其较高的空隙率不仅成为水分侵入的通道，加速沥青老化，而且在冬季水分进入空隙后结冰膨胀，会加剧混合料的剥离与松散，形成恶性循环<sup>[10]</sup>。层间粘结不良的结构，其整体性能被破坏，各结构层无法协同工作，应力传递异常，大大降低了路面的抗弯拉和抗剪切能力，使得路面在重载交通下更易产生结构性损坏。对于水泥混凝土路面，早期受冻或强度发展不充分，会直接降低其抗折强度与耐磨性，表面易产生起砂、剥落，接缝处更易损坏。这些由低温施工埋下的质量隐患，往往在交通荷载和自然环境的耦合作用下，在路面投入使用后的较短时间内便暴露出来，表现为各种早期病害，极大地缩短了养护工程的有效使用寿命<sup>[9]</sup>。

## 二、结合地方公路管理段职能与“三清高速”案例的特殊性分析

### （一）地方公路管理段冬季养护的职责特点与困境

地方公路管理段是养护体系的基层单元，负责巡查、小修保养、预防性养护及应急抢险。冬季养护特点鲜明：以预防性为

主，重点保障防滑与通行安全，主动修复工程减少；应急性突出，需快速处置冰雪灾害、突发坑槽等；兼具计划性与灵活性，虽避免严寒期安排大中修，但对突发损毁或保通任务仍可能面临冬季施工<sup>[9]</sup>。其困境具体表现为：资源与技术有限，缺乏专业温控设备、保温运料车及实时监控系統，远距离材料运输温度损失大；成本压力显著，冬季施工需额外投入保温、防冻等措施，在经费紧张下需权衡修复紧迫性与经济性；质量控制难度高，技术人员对低温工艺掌握不足，且低温环境下取芯、压实度检测等作业困难，进一步增加质量风险<sup>[7]</sup>。

### （二）“三清高速”案例中冬季修复工程的矛盾聚焦

“三清高速”案例中，重型施工车辆长期高强度使用地方道路（如马方线、马纳线等），造成结构性损毁，其修复成为紧迫的民生工程。与常规养护相比，冬季施工矛盾尤为尖锐：一是工期与季节冲突。为在春节前保通，部分修复（如2021年12月—2022年2月）不得不“逆季节”进行。二是修复规模集中，资源调配难。损毁路段点多面广，冬季大规模施工时，保障全线材料温度与工艺一致性，管理与技术难度剧增。三是资金支付滞后加剧被动。费用拖欠导致无法采购低温改性沥青、租赁充足保温设备，甚至简化必要工序，埋下质量隐患。该案例表明，当工期、社会压力与环境制约叠加时，质量风险会被急剧放大<sup>[9]</sup>。

### （三）两类场景对系统性应对措施的共同需求

尽管地方公路管理段常规养护与“三清高速”类应急修复在规模、动因上存在差异，但二者面对低温挑战时均迫切需要一套系统、可操作且经济适用的应对体系<sup>[9]</sup>。该体系必须能够切实应用于基层实际场景，其核心应包含：适用于小规模、分散作业的材料方案，如便于现场存储使用的高性能冷补料；适配基层现有设备条件的工艺改良，例如优化后的冷补与薄层修补技术；以及强化现场动态决策与质量管控的流程，比如基于气象预报灵活安排施工窗口、推行简捷有效的快速检测方法。因此，后续的应对措施研究必须紧密结合这些实践场景的复杂性与现实约束。

## 三、应对冬季低温环境的道路养护施工综合技术措施

### （一）基于材料改性与选用的适应性对策

材料是应对低温挑战的第一道防线。核心思路是通过改性或选用特定材料，拓宽其在低温下的施工适应窗口和性能稳定区间<sup>[10]</sup>。对于沥青混合料，首选措施是采用低温施工型改性沥青。例如，高含量SBS改性沥青（SBS掺量通常 $\geq 4.5\%$ ）能显著提高沥青的低温延度（可达到 $>30\text{cm}$ ， $5^\circ\text{C}$ ）和弹性恢复能力，使其在 $-20^\circ\text{C}$ 甚至更低温度下仍能保持较好的柔韧性，避免脆裂。对于冬季应急修补，应储备和使用高性能冷补料。其核心技术在于使用特种改性液体沥青（如基于煤焦油或特种石油馏分的粘结剂），配合缓挥发稀释剂，使混合料在常温下保持疏松、不结块，可袋装存储数月。理想的冷补料应具备良好的初始稳定性（马歇尔稳定度宜大于 $3\text{kN}$ ）和后期固化性能，在碾压后2-4周内强度可达到热拌沥青混合料的70%-80%。虽然其长期性能和水稳定性通常不及热拌料，但能有效满足冬季应急保通和临时修补的需求。

## （二）施工工艺的优化与技术创新

在既定材料基础上，工艺精细化控制是关键，核心是“抢温度、保压实、强粘结”。一是温度链全程管控：拌和料出料后须采用双层保温棉加顶部油布覆盖的运料车；精确规划运输路线与时间，减少中转等待；摊铺前应对下层预热，采用红外线加热板或热风枪消除冰霜、提升层温，这对薄层修补尤为重要。二是压实工艺强化创新：配备足量适宜压路机，紧跟摊铺机实施“高温、紧跟、强振”碾压，优先选用高频低幅振动压路机以提升压实效率；对接缝、路缘等部位采用小型振动夯或手持压实机具充分压实。三是层间粘结加强：喷洒粘层油前确保下层干燥、清洁、温暖，选用破乳快、粘结强的SBS改性乳化沥青，必要时对粘层轻度预热以促渗透。水泥混凝土施工应采用综合蓄热法：使用加热的拌合水与骨料；浇筑后立即覆盖保温层；有条件时可搭设暖棚并辅以热风机加热，确保混凝土在正温下达临界强度。

## （三）施工过程的动态监测与质量控制

冬季施工必须建立比常温下更密集、灵敏的质量控制网络。核心是温度的实时监测与反馈控制，应在混合料出厂、到场、摊铺前后、压实前后等多个节点，使用数显温度计或红外测温枪进行多点快速测量，形成温度曲线。一旦温度接近或低于下限，须立即调整或停止作业。压实度控制应注重过程，采用无核密度仪（PQI）等进行实时、无损检测，快速发现薄弱区并补压。同时强化现场试验与快速检测，包括对摊铺均匀性、离析情况的目测，以及对冷补料的马歇尔稳定度快速试验。所有数据应详细记录，并与环境温度、风速等气象数据关联分析，为工艺调整与质量追溯提供依据。对于“三清高速”类大型集中修复工程，宜建立基于物联网的远程监控中心，对全线各作业点的材料温度、运输轨迹与关键参数进行集中监控与调度，确保施工质量受控。

## 四、面向实践的管理策略与建议

### （一）科学规划与动态决策机制

管理层面首要任务是建立基于气象预报的冬季施工科学决策机制。在编制年度养护计划时，应主动规避本地区持续严寒期安

排大型路面修复工程。对于必须实施的应急性或跨季度工程，应在施工组织设计中详细编制冬季施工专项方案，并设置清晰的气象门槛条件（如日平均气温低于5℃或预计气温持续下降时）。在施工期间，应指定专人负责与气象部门对接，获取72小时精细预报，每日召开施工前协调会，根据预报动态决定当日是否开工、开工时间以及采取的强化措施等级。这种“看天施工”的动态决策，是避免盲目施工、减少质量风险的最经济有效的手段。

### （二）资源配置与供应链保障

保障冬季施工质量需要额外的资源投入，管理方必须提前谋划。在设备配置方面，应评估并配备足保温运料车、预热设备（热风枪、红外加热板）、高效压实设备（如高频压路机）以及快速检测仪器。对于基层单位，可以考虑区域性设备租赁共享平台。在材料供应链方面，应提前与沥青拌和站、水泥制品厂及冷补料供应商签订冬季供货协议，明确冬季专用材料的性能指标、供应能力和应急响应机制。特别是要确保低温沥青、早强水泥、防冻剂等关键物资的稳定供应渠道和合理库存。在资金保障方面，对于“三清高速”类项目，项目业主或协调指挥部应建立专项资金支付绿色通道，确保修复费用及时、足额支付到位，避免施工单位因资金压力而牺牲材料质量和工艺要求，这在相关报告反映的“资金严重短缺”、“打折支付”问题背景下尤为重要。

### （三）人员培训与长效机制建设

最终，所有技术和管理的执行者是人。必须加强对一线管理人员、技术人员和操作工人的冬季施工专项培训。培训内容应涵盖低温对材料与工艺的影响原理、本地区适用的冬季施工技术规范、特殊设备操作规程、应急质量问题的识别与处置等。

## 五、结语

冬季低温通过影响材料、工艺与结构耐久性，对道路养护质量构成系统性威胁。应对挑战需技术与管理并重：研发低温材料、优化温控工艺、强化动态监测，并建立科学决策、资源保障及培训长效机制，推动养护工作从被动应对转向主动驾驭，以保障工程质量、资金效益与公路韧性，服务社会经济发展。

## 参考文献

- [1] 徐舜枫. H市新区市政道路养护管理体系改进研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2022.
- [2] 付英俊, 张晓东. 高速公路对周边环境的影响与冬季防滑应对措施分析[J]. 内蒙古科技与经济, 2022, (03): 108-109+111.
- [3] 王青云. 冬季道路养护手段的效率与方法分析[J]. 中外企业家, 2020, (21): 231.
- [4] 曲胜. 高速公路冬季除雪作业及养护措施[J]. 现代经济信息, 2018, (21): 324.
- [5] 于超. 乌鲁木齐市主要道路使用性能现状分析及养护对策[D]. 新疆农业大学, 2015.
- [6] 王峰. 半柔性抗车辙技术在市政道路养护工程中的应用[J]. 工程技术研究, 2020, 5(23): 77-78.
- [7] 李会娜, 马宇翔, 王颖. 市政道路施工中沥青混凝土道路施工技术研究[J]. 散装水泥, 2022(02): 79-80.
- [8] 赵军. 沥青混凝土道路施工技术在市政道路施工中的应用研究[J]. 中国高新科技, 2022(06): 62-64+98.
- [9] 李雅. 道路桥梁工程的原材料试验检测技术探讨[J]. 居舍, 2020(3): 25.
- [10] 宋非. 道路桥梁工程水泥与混凝土施工材料检测研究[J]. 绿色环保建材, 2021(8): 1-2.