

寒冷地区公路施工中的防冻与保温技术研究

张卫东

甘肃省康乐县县乡公路养护管理站 甘肃 临夏 731500

摘要：寒冷地区公路施工受低温、冻融循环等影响显著，易引发混凝土冻胀破坏、沥青路面脆裂及土基融沉等病害。本研究聚焦材料改性（如防冻剂、温拌沥青、石灰稳定土）、施工保温（蒸汽养护、保温棚、预融法）及智能监测技术（分布式光纤测温、冻深预测模型），通过优化配比、强化工艺控制及实时预警，有效降低冻害风险。成果应用于工程实践，显著提升施工效率与结构耐久性，为寒冷地区公路建设提供技术支撑。

关键词：寒冷地区；公路施工；防冻；保温技术

引言：在寒冷地区，公路施工常面临低温、冻融循环等严苛环境，易引发混凝土冻胀、沥青脆裂、土基融沉等病害，直接影响工程结构安全与耐久性。传统防冻保温措施多依赖经验，存在效率低、成本高、耐久性不足等问题。本研究系统梳理气候条件对施工的影响机理，结合材料改性、工艺优化及智能监测技术，探索低成本、高效能的防冻保温方案，为寒冷地区公路建设提供理论支撑与技术保障，助力行业高质量发展。

1 寒冷地区公路施工环境与病害机理分析

1.1 气候条件对施工的影响

(1) 温度阈值划分：负温施工临界值通常以-5℃为界，当环境温度低于该值时，混凝土水化反应速率显著减缓，易出现冻害；冻融循环温度范围多集中在-20℃~5℃，此区间内水分反复冻结膨胀与融化收缩，会加速公路结构损伤。(2) 风速、湿度与温度的耦合作用：低温环境下，风速每增加1m/s，体感温度下降2~3℃，会加剧施工人员冻伤风险，同时加速施工材料水分蒸发，导致混凝土表面开裂；高湿度与低温叠加时，易在结构表面形成冻霜，降低材料黏结强度，影响施工质量。

1.2 典型工程病害及成因

(1) 混凝土结构：冻胀破坏源于内部孔隙水结冰体积膨胀，产生内应力导致裂缝；碱骨料反应加速则因低温使混凝土内部湿度升高，促进碱性物质与骨料中活性成分反应，生成膨胀性产物，破坏结构完整性。(2) 沥青路面：低温下沥青分子运动减缓，混合料柔韧性下降，易发生低温脆裂；车辙变形加剧是由于冻融循环使路面基层强度降低，在车辆荷载反复作用下，路面出现永久性变形。(3) 土基工程：土基中的水分冻结膨胀，导致路基隆起，融化后土体密实度降低，引发冻胀融沉；同时，冻融作用破坏土颗粒间的黏结力，使土基承

载力显著下降^[1]。

1.3 材料性能劣化模型

(1) 混凝土抗冻性指标：采用动弹性模量损失和质量损失率来表征混凝土抗冻性能劣化，随着冻融循环次数增加，混凝土内部微裂缝扩展，动弹性模量逐渐降低，当损失率超过25%时，混凝土结构基本丧失承载能力；质量损失率则反映混凝土表面剥落程度，冻融循环次数越多，质量损失越大，通常控制质量损失率不超过5%为合格标准。(2) 沥青混合料低温性能评价：弯曲破坏应变是关键指标，低温下应变值越小，混合料抗裂能力越差，规范要求在-10℃条件下，弯曲破坏应变不小于2000με；劲度模量则反映混合料抵抗变形的能力，低温劲度模量越大，混合料越脆，易产生裂缝，需通过合理级配设计控制劲度模量在合理范围。

2 寒冷地区公路施工中的防冻与保温技术分类及原理

2.1 材料改性防冻技术

2.1.1 混凝土防冻技术

(1) 外加剂应用：早强型减水剂可在降低水灰比、改善混凝土和易性的同时，加速水泥水化反应，缩短初凝时间，提升混凝土早期强度，避免低温下强度增长缓慢导致的冻害；引气剂能在混凝土内部引入均匀分布的微小气泡，气泡可缓冲水分冻结产生的膨胀应力，减少裂缝产生；防冻剂（如氯盐类、无氯盐类）通过降低混凝土内部水分冰点，使混凝土在负温环境下仍能持续水化，保障结构强度发展。(2) 新型低热混凝土配比设计：采用粉煤灰、矿渣微粉等工业废渣替代部分水泥，一方面可减少水泥用量，降低水化热释放，避免混凝土内部因温差过大产生温度应力裂缝；另一方面，废渣中的活性成分能与水泥水化产物发生二次反应，优化混凝土内部孔隙结构，提升抗冻性和密实度，增强对低温环境的适应性。

2.1.2 沥青路面防冻技术

(1) 温拌沥青技术：通过添加温拌剂（如有机降黏剂、表面活性剂）降低沥青混合料的黏度，使混合料在较低温度（较热拌沥青低30~50℃）下即可达到施工和易性，减少施工过程中的热量损耗；同时，较低的施工温度可降低沥青老化程度，提升路面低温抗裂性能，避免因高温施工与低温环境温差过大导致的路面早期损伤。

(2) 橡胶粉/纤维改性沥青：橡胶粉（多源自废旧轮胎）与沥青混合后，可利用橡胶的弹性特质提升沥青的低温柔韧性，减少低温下沥青的脆性开裂；纤维（如聚酯纤维、玄武岩纤维）在沥青混合料中可形成三维网状结构，增强混合料的抗拉强度和抗变形能力，延缓低温收缩裂缝的产生与扩展^[2]。

2.1.3 土基防冻技术

(1) 石灰/水泥稳定土：向土基中掺入石灰或水泥，石灰与土中的黏土成分发生化学反应生成稳定的胶凝物质，水泥则通过水化反应形成水泥石骨架，二者均能填充土颗粒间隙，抑制水分在土基内部的迁移与聚集，减少冻结时水分膨胀产生的冻胀力，同时提升土基整体强度和稳定性。(2) 隔温层材料：聚苯乙烯泡沫板、气泡轻质土等材料具有极低的导热系数，铺设于土基上部或路基边坡处，可形成隔热屏障，减少外界低温向土基内部传递，降低土基冻结深度；同时，这类材料质地轻便、压缩性低，能避免自身因冻融循环产生变形，保障土基结构稳定。

2.2 施工过程保温技术

2.2.1 结构物保温措施

(1) 主动加热法：蒸汽养护通过向封闭养护空间通入高温蒸汽，维持混凝土结构周围的高温高湿环境，加速水泥水化，防止混凝土受冻；电热毯、红外线加热则通过电能转化为热能，直接对混凝土表面或内部进行加热，确保施工过程中结构温度不低于临界冻害温度，尤其适用于桥墩、盖梁等大型结构物。(2) 被动保温法：搭建保温棚（多采用彩钢板与保温棉组合结构）可隔绝外界低温与寒风，形成相对稳定的保温空间；棉被、土工布等覆盖材料能减少结构表面热量散失，适用于混凝土浇筑后的养护阶段；相变材料（如石蜡类、无机盐类）可在温度变化时吸收或释放热量，维持结构周围温度稳定，避免温度骤降导致的冻害。

2.2.2 路面施工保温工艺

(1) 沥青混合料运输保温：采用带有温控装置的专用车箱，通过电加热或保温层设计维持混合料温度，防止运输过程中温度过快下降；车箱顶部覆盖多层保温棉

被（内层为阻燃保温棉，外层为防水帆布），进一步减少热量散失，确保混合料到场温度满足摊铺要求（通常不低于140℃）。(2) 摊铺与碾压温度控制：采用连续作业模式，缩短混合料从到场、摊铺到碾压的间隔时间，减少热量损耗；对施工路段进行分段保温，已摊铺未碾压的路面覆盖保温毯，碾压完成后及时铺设乳化沥青封层并覆盖保温材料，防止路面温度骤降引发收缩裂缝^[3]。

2.2.3 土方工程保温技术

(1) 预融法：在土方开挖前，通过埋设地热管通入热水或蒸汽，对冻土层进行预热融化，或在地表撒布化学融雪剂（如氯化钙、氯化钠）降低冻土冰点，加速冻土层融化，避免开挖过程中冻土块对施工设备的损坏，同时减少融化后土基的不均匀沉降。(2) 覆盖保温法：土方开挖后，对暴露的土基表面及时覆盖土工布（具有保温、防渗功能）或草帘，减少低温对土基的冻结影响；对暂不施工的路基段落，覆盖多层保温材料并压实，防止雨雪渗透与低温冻胀，为后续施工保留稳定的土基条件。

2.3 监测与预警技术

2.3.1 温度场实时监测

(1) 分布式光纤测温技术：将分布式光纤传感器埋入混凝土结构、土基或路面内部，利用光纤的光时域反射原理，实现对监测区域温度的连续、实时监测，可精准捕捉温度分布规律与变化趋势，分辨率可达1m以内，及时发现局部低温区域，为保温措施调整提供依据。

(2) 无线传感器网络（WSN）：在施工区域布设多个无线温度传感器，传感器通过无线信号将实时温度数据传输至监控终端，形成覆盖全施工面的监测网络；该技术安装便捷、成本较低，可实现远程实时监控，适用于大面积土方工程、路面施工的温度监测。

2.3.2 冻融灾害预警系统

(1) 基于气象数据的冻深预测模型：整合当地历史气象数据（气温、降雪量、风速）与实时气象信息，通过机器学习算法建立冻深预测模型，可提前3~7天预测土基冻深变化，当预测冻深超过安全阈值（通常根据路基设计要求确定）时，及时发出预警，提醒调整施工计划或加强保温措施。(2) 结构应力-温度耦合预警阈值：通过有限元分析建立混凝土结构、沥青路面的应力-温度耦合模型，确定不同温度下结构的安全应力阈值；结合实时监测的温度与应力数据，当结构应力接近或超过阈值时，系统自动发出预警，防止因低温应力过大导致结构开裂、破坏。

3 寒冷地区公路施工中的防冻与保温技术挑战与优化建议

3.1 现存问题

(1) 保温措施与施工效率的矛盾：当前主流保温措施（如传统保温棚）存在搭建流程复杂、耗时较长的问题。以混凝土结构施工为例，传统保温棚需现场裁切钢架、铺设保温棉，单座中型桥墩保温棚搭建需2~3天，期间施工工序需暂停，导致工期延误；同时，部分被动保温措施（如多层棉被覆盖）在后续结构养护、检查时需反复拆卸与重新覆盖，进一步增加工序衔接时间，尤其在冬季施工窗口期短的地区，效率矛盾更为突出。（2）材料改性成本较高：高性能改性材料的应用成本显著高于常规材料，制约技术推广。例如，橡胶粉改性沥青单价较普通沥青高30%~50%，且橡胶粉与沥青的混合需专用设备（如高剪切胶体磨），设备投入与运维成本进一步增加；土基防冻用气泡轻质土，因生产过程需精准控制气泡含量与密度，材料单价是普通填土的2~3倍，对于大规模土方工程而言，成本压力较大。（3）长期耐久性验证不足：部分防冻技术的长期性能影响尚未明确，存在潜在风险。如部分氯盐类防冻剂虽能有效降低混凝土冰点，但长期使用会导致钢筋锈蚀，影响结构耐久性，目前多数工程仅通过5~10年的短期监测评估性能，缺乏20年以上的长期数据支撑；此外，新型隔温层材料（如聚苯乙烯泡沫板）在冻融循环与荷载长期作用下的老化速率、抗压强度衰减规律尚未完全明确，可能引发后期路基沉降问题。

3.2 改进方向

(1) 开发复合型多功能防冻剂：聚焦“一剂多效”研发，突破单一功能局限。例如，研发早强-减水-防冻复合型外加剂，通过复配有机胺类早强成分、聚羧酸类减水成分与无氯防冻成分，在降低混凝土冰点的同时，减少拌合用水量、加速早期强度发展，既简化外加剂添加工序，又降低材料总成本，目前实验室阶段已实现-10°C环境下混凝土3天强度达设计强度的50%，且后期强度无

衰减。（2）推广模块化快速保温装置：以装配式理念优化保温设备设计，如开发模块化保温棚，将钢架结构、保温板预制成标准模块，现场通过螺栓拼接，搭建时间可缩短至4~6小时（较传统缩短80%以上）；同时，研发可移动保温罩（适配不同尺寸桥墩、挡墙），采用轻质合金框架与阻燃保温棉，无需拆卸即可随施工进度移动，大幅提升工序衔接效率^[4]。（3）加强全生命周期监测：推动BIM与物联网技术深度融合，构建动态监测体系。在施工阶段，将温度传感器、应力传感器嵌入结构内部，通过物联网实时传输数据至BIM模型，可视化呈现温度场、应力场变化；运营阶段，利用BIM模型记录结构冻融损伤数据（如裂缝发展、强度衰减），结合机器学习算法预测耐久性寿命，当监测数据接近安全阈值时，自动发出维护预警，实现从“被动维修”到“主动防控”的转变。

结束语

寒冷地区公路施工的防冻与保温技术研究，是保障工程质量、延长使用寿命的关键。通过材料改性、工艺优化与智能监测技术的综合应用，可有效抵御低温冻害，减少冻融循环对结构的损伤。本研究提出的复合型防冻剂、模块化保温装置及全生命周期监测体系，不仅提升了施工效率，也增强了结构的长期耐久性。未来需持续探索新技术、新材料，推动防冻保温技术向智能化、绿色化方向发展，为寒冷地区公路建设提供更强支撑。

参考文献

- [1]王晓明.高寒地区公路冻胀问题的研究与防治[J].农业工程学报,2020,36(12):150-151.
- [2]李强.高寒地区路基防冻技术探讨[J].土木建筑工程信息技术,2020,11(6):117-118.
- [3]陈明.寒冷地区高速公路路基冻害病因分析及处理措施[J].四川水泥,2024,(08):90-92.
- [4]王颖.北方寒冷地区高速公路路基冻害原因分析及处治方案[J].黑龙江交通科技,2020,42(12):67-68.