

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°C 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 $-20^{\circ}\text{C}\sim 5^{\circ}\text{C}$ ，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 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ ，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 -10°C 条件下，弯曲破坏应变不小于 $2000\mu\epsilon$ ；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) 隔热层材料: 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℃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.