

寒冷山区高速公路改扩建的关键技术与实践路径探究

赵康先

浙江交工路桥建设有限公司, 浙江 杭州 311305

DOI:10.61369/ADA.2026010068

摘 要 : 寒冷山区高速公路改扩建工程, 始终面临低温冻融侵蚀、地形地质复杂、生态环境脆弱、施工保通艰巨等多重现实困境, 新旧工程拼接、结构抗冻耐久、灾害防控治理成为工程实施的核心难题。本文立足寒冷山区特殊地域环境与工程建设实际, 系统梳理该类改扩建工程的核心制约因素, 从路基工程、路面工程、桥隧工程、施工管控、生态保护五大维度, 提炼适配高寒山区的关键技术体系, 并结合具体工程实践验证技术应用成效。研究表明, 针对性的路基沉降控制、路面抗冻提质、桥隧加固改造、分段保通施工及生态智能防控技术, 可有效破解寒冷山区高速改扩建的冻融病害、结构失稳、通行保障等问题, 既能提升工程建设质量与长期服役性能, 也能为同类高寒山区公路改扩建工程提供理论参考与实践遵循。

关 键 词 : 寒冷山区; 高速公路改扩建; 工程技术; 实践应用; 冻融防控; 生态保护

Exploration of Key Technologies and Practical Approaches for the Reconstruction of Highways in Cold Mountainous Areas

Zhao Kangxian

Zhejiang Jiaogong Road and Bridge Construction Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311305

Abstract : The expansion and renovation project of expressways in cold mountainous areas always faces multiple practical challenges such as low-temperature freeze-thaw erosion, complex terrain and geology, fragile ecological environment, and difficult construction and traffic protection. The integration of new and old projects, structural frost resistance and durability, and disaster prevention and control have become the core problems in the implementation of this project. Based on the special geographical environment and engineering construction practice in cold mountainous areas, this paper systematically analyzes the core constraints of such expansion and renovation projects, and from five dimensions including subgrade engineering, pavement engineering, bridge and tunnel engineering, construction control, and ecological protection, extracts the key technical systems suitable for cold mountainous areas. Combined with specific engineering practices, the effectiveness of technology application is verified. The research shows that targeted technologies such as roadbed settlement control, pavement anti-freezing improvement, bridge and tunnel reinforcement and renovation, segmented traffic protection construction, and ecological intelligent prevention and control can effectively solve the problems of freeze-thaw damage, structural instability, and traffic guarantee in the expansion and renovation of expressways in cold mountainous areas. These technologies can not only improve the construction quality and long-term service performance but also provide theoretical references and practical guidance for similar expansion and renovation projects of highways in cold mountainous areas.

Keywords : cold mountainous areas; expressway expansion and renovation; engineering technology; practical application; freeze-thaw prevention and control; ecological protection

前言

相较于平原地区, 寒冷山区独特的低温严寒、大温差冻融、陡坡地形、脆弱生态等环境特征, 让改扩建工程在技术实施、施工组织、质量管控等方面面临更多挑战, 现有工程技术与建设模式难以完全适配。当前学界针对寒冷地区公路工程的研究多聚焦新建项目, 针对改扩建工程的系统性技术研究与实践总结仍有不足, 尤其缺乏兼顾地域特殊性、工程实用性与生态保护性的综合技术体系。基于此, 本文以寒冷山区高速公路改扩建工程为研究对象, 剖析工程建设核心难点, 探究关键技术应用路径, 结合实践案例总结经验, 以期丰富寒冷山区公路工程建设研究成果, 推动高寒地区交通基础设施高质量发展。

一、寒冷山区高速公路改扩建工程的核心现实困境

（一）气候条件严苛，冻融病害频发

寒冷山区常年气温偏低，极端低温可达-40℃，昼夜温差与季节温差悬殊，年冻融循环次数远超普通地区，冻融作用成为工程建设的首要制约因素。长期冻融循环下，既有路基土体结构受损，新老路基密实度、含水率差异引发冻胀融沉不协调，极易出现路基纵向开裂、整体沉降、边坡滑塌等问题；沥青路面在低温环境下脆性增强，新旧路面拼接处易产生温缩裂缝与反射裂缝，加之融雪剂侵蚀、冻融循环双重作用，路面破损速度加快，使用寿命大幅缩短；桥隧结构受冻胀力与冻融反复侵蚀，混凝土易出现冻裂、剥落问题，内部钢筋锈蚀老化，结构稳定性与安全性持续下降。

（二）地形地质复杂，拼接施工难度大

寒冷山区多为高山陡坡、沟壑纵横地貌，地质条件复杂，多分布软弱土、冻土、破碎围岩等不良地质，改扩建工程多采用单侧或双侧拼宽、局部改线的建设模式，新旧工程拼接施工难度极高。路基拼宽时，新填路基压实作业受限，新旧路基结合面易形成软弱夹层，在荷载与冻融作用下，差异沉降、横向滑移风险突出；桥梁拼宽需兼顾新旧基础沉降协同、上部结构连接应力平衡，隧道原位扩建则面临围岩变形、衬砌开裂等安全隐患；改扩建开挖形成的高陡边坡，在冻土融化后土体强度骤降，极易诱发滑坡、泥石流等地质灾害，工程安全管控压力巨大。

（三）施工组织复杂，保通与安全矛盾突出

寒冷山区高速公路多为区域交通主干线，改扩建工程需遵循“边通车、边施工”原则，施工组织与交通保通难度极大。山区道路线形复杂、车道宽度有限，半幅施工、半幅通行的模式易引发交通拥堵，交通事故发生概率提升；高边坡开挖、桥隧施工、深基坑作业等工序紧邻运营路段，飞石、坍塌等安全隐患突出，且低温环境下施工机械性能衰减、人员作业效率降低，进一步加剧施工安全风险。同时，寒冷山区有效施工期仅为每年5-10月，冻融季节无法开展路基、路面施工，工期紧张与工程质量、施工安全的矛盾尤为显著。

（四）生态环境脆弱，环保要求严苛

寒冷山区大多属于生态敏感区，生态系统自我修复能力弱，工程建设中的高填深挖、弃渣堆放、施工扰动等行为，极易破坏原生植被、加剧水土流失、影响水源涵养与生态平衡。低温环境下植被存活率低、生态修复周期长，加之工程建设需兼顾野生动物保护、冻土生态保护，环保管控标准远高于普通地区，对工程建设的生态保护措施提出了更高要求，也增加了改扩建工程的实施难度。

二、寒冷山区高速公路改扩建关键技术体系构建

（一）路基拼接稳定与冻融防控技术

路基工程是改扩建工程的基础，核心在于解决新旧路基拼接稳定性与冻融病害防控问题。在新旧路基差异沉降控制方面，先

借助地质雷达完成旧路基病害探测，对软弱路段开展换填、注浆加固处理，清理旧路基边坡并开挖标准化台阶，强化新旧路基咬合度；选用级配碎石、砂砾石等抗冻性优良的填料，掺入石灰、水泥进行土质改良，严控填料含水率与压实度；在新旧路基结合处铺设土工格栅，高填方路段采用复合地基、桩承式挡土墙加固，分层严控填筑厚度与碾压质量，从源头减少差异沉降。

在冻融病害防控上，构建“防冻、排水、保温、监测”一体化技术体系，合理提高路基高度规避冻融影响层，路基底部铺设防水隔水层，阻断地下水毛细上升；完善路基排水系统，增设边沟、渗沟、盲沟等设施，及时疏排路基内部积水；在路基表层铺设保温材料，降低温度变化对路基土体的影响；布设沉降、冻胀监测设备，实时监控路基变形状态，实现冻融病害提前预警。^[1]

（二）路面抗冻耐久与无缝拼接技术

路面工程重点提升抗冻性能与新旧路面拼接质量，采用低温改性沥青路面材料与复合路面结构，选用SBS改性沥青并添加低温抗裂添加剂，优化沥青混合料配合比，掺入纤维材料提升路面低温抗裂性与抗冻耐久性，推广旧路面铣刨料再生利用技术，实现资源循环利用。

新旧路面无缝拼接采用“预处理-过渡-粘结-加固”的施工流程，先铣刨清理旧路面破损部位，完成裂缝灌缝与基层补强；设置合理长度的渐变过渡段，避免新旧路面厚度突变产生应力集中；强化层间粘结处理，喷洒高粘乳化沥青并铺设抗裂格栅；对接缝进行密封加固与防水处理，防止雨水渗入引发冻融破坏，减少拼接处裂缝、跳车等问题，保障路面平整性与耐久性。^[2]

（三）桥隧改扩建加固与防冻减振技术

桥梁工程改扩建以拼宽加固与抗冻防护为核心，新桥梁基础采用钻孔灌注桩并嵌入稳定岩层，严控新旧基础沉降差，设置沉降缝释放温度与沉降应力，上部结构通过柔性连接方式降低应力集中；对旧桥梁墩台、盖梁破损部位采用高性能混凝土修补，锈蚀钢筋进行除锈防腐处理，桥面铺装采用抗冻防水复合结构，提升桥梁整体抗冻性能与结构强度；施工中采用减振爆破技术，减少施工振动对既有桥梁结构的损伤，配套完善安全防护设施。

隧道改扩建采用原位拓宽与病害加固相结合的技术，选用无中导洞快速开挖工法，软弱围岩段采用联合支护技术，严控围岩变形；通过微差爆破、光面爆破降低施工振动对原有衬砌的影响；对隧道衬砌裂缝、剥落部位进行注浆与加固修复，铺设防水保温层，优化洞内排水系统，隧道进出口设置防风保温设施，防范洞内渗水结冰、衬砌冻裂等问题，保障隧道结构安全。^[3]

（四）施工安全保通与生态防护技术

施工组织采用分区分段、流水作业模式，划分施工区、通行区与缓冲区，设置标准化围挡、警示标识与夜间照明设施，实行半幅封闭施工、半幅双向通行，优化交通导流方案，减少施工对交通通行的影响；加强低温施工安全管控，合理安排施工工序，严控低温露天施工作业，做好施工机械防寒保养与人员安全防护，防范各类施工安全事故。

生态防护秉持绿色建设理念，高陡边坡采用锚杆框架梁结合客土喷播技术，选用耐寒耐旱本土植物开展边坡绿化，实现边坡

加固与植被恢复；规范设置弃土场，配套挡渣、排水与植被恢复措施，推动施工废料再生利用，减少固体废弃物排放；施工中尽量减少冻土与原生植被破坏，施工废水经处理达标后排放，严控施工扰动范围，最大程度降低工程对生态环境的影响。^[4]

（五）智能监测与冬季通行保障技术

构建工程全周期智能监测体系，实现施工与运营全流程动态化、精细化管控。施工期依托“空天地一体化”监测手段，搭配高精度沉降传感器、边坡位移监测仪、应力应变监测设备、围岩压力传感器，对路基差异沉降、高陡边坡滑移、桥隧结构应力、基坑围岩变形等关键指标进行24小时不间断实时监测，同步搭建BIM数字化管控平台，将监测数据与工程三维模型联动，实时反馈施工参数偏差，自动预警施工风险，便于及时调整施工工艺与管控方案，有效规避冻融扰动、地质变形引发的施工安全隐患，保障改扩建施工有序推进。运营期构建路面与结构双维度监测网络，在路基路面、桥隧结构内部署温湿度传感器、冻融监测仪、结构健康监测终端，借助物联网技术实现数据云端传输、智能分析，精准预判冻融病害、结构老化、路面破损等问题，形成“监测-分析-预警-处置”的闭环管理，全面掌握工程长期服役状态，为后期养护维修提供数据支撑。

针对寒冷山区冬季漫长、冰雪频发、路面易结冰的通行难题，构建全链条冬季通行安全保障技术体系，聚焦桥面、隧道进出口、陡坡急弯、背阴路段等冰雪易积聚高危路段，针对性布设智能化融雪化冰设施。推广应用环路热管智能融雪系统、石墨烯光伏发热融雪技术，无需外接大量市电，依托清洁能源即可实现路面主动升温化冰，可在降雪初期快速融化积雪，避免路面结冰，全程无人值守、自动化启停；同时摒弃高腐蚀传统融雪剂，全面推广环保型氯化钙复合融雪剂、固态防滑沙，搭配路面自动化撒布设备，实现冰雪天气快速处置。此外，建立冬季气象预警与道路管控联动机制，实时对接气象数据，提前发布冰雪预警，同步布设路面冰雪监控摄像头，实时掌握路段通行状态，实现冰雪天气精准管控、快速处置，彻底解决寒冷山区冬季道路通行隐患，保障高速公路全天候安全、平稳、顺畅通行，大幅降低冬季交通事故发生率，提升道路运营服务水平。^[5]

三、工程实践应用与成效分析

（一）工程概况

选取东北高海拔寒冷山区某高速公路改扩建工程为实践案例，项目全长42.5km，区域年均气温-2.3℃，极端低

温-38.7℃，年冻融循环次数达180次，沿线地形以高陡边坡、沟壑、桥隧群为主，地质条件复杂、生态环境敏感。项目由双向四车道改扩建为双向八车道，采用两侧拼宽结合局部改线方案，施工周期2年，有效施工期集中在每年5-10月，面临冻融病害防控、新旧结构拼接、交通保通、生态保护等多重难题。

（二）技术应用实施

项目全面应用上述改扩建关键技术，路基工程完成旧路基病害整治、新填料改良与拼接加固，配套完善冻融防控与监测设施；路面工程采用低温改性沥青复合路面，实施新旧路面无缝拼接施工；桥隧工程开展拼宽加固、抗冻减振与病害修复；施工阶段落实分区分段保通施工与精细化安全管控，同步实施边坡绿化、弃渣治理等生态保护措施，布设智能监测设备与冬季融雪防滑设施，全方位保障工程建设质量与运营安全。

（三）实践应用成效

工程实践结果表明，该套技术体系应用效果显著：路基差异沉降控制在规范限值以内，无冻融沉降、开裂等病害，路基稳定性大幅提升；路面低温抗裂性与抗冻性能优良，拼接处无裂缝、跳车问题，路面完好率与平整度显著提高；桥隧结构稳定，无冻损、变形等安全隐患，结构服役性能达标；施工期间未发生重大安全事故，交通通行保障有力，工程建设对周边生态环境影响极小，旧路废料实现百分百再生利用，生态环保效益突出。

从效益层面来看，项目通过技术优化缩短了有效工期，降低了工程返工与后期养护成本，经济效益显著；道路通行能力实现翻倍提升，有效缓解了区域交通压力，保障了寒冷山区交通出行安全，带动了沿线经济社会发展，同时践行了绿色交通建设理念，为同类寒冷山区高速公路改扩建工程提供了可复制、可借鉴的实践经验。^[6]

四、结语

寒冷山区高速公路改扩建是一项兼顾技术复杂性、环境特殊性、施工艰巨性的系统工程，核心在于破解冻融病害、结构拼接、施工保通、生态保护四大核心难题。本文立足寒冷山区地域环境特征，构建了涵盖路基、路面、桥隧、施工组织、生态防控、智能监测的全方面关键技术体系，经工程实践验证，该技术体系可有效适配寒冷山区工程建设需求，全面提升改扩建工程质量、结构耐久性与运营安全性，实现工程建设与生态保护的协同发展。

参考文献

[1] 交通运输部. JTG/T L11—2014 高速公路改扩建设计细则 [S]. 北京：人民交通出版社股份有限公司，2015.
[2] 吉林省交通科学研究所，哈尔滨工业大学. 寒区高速公路改扩建路基路面建设关键技术及应用研究 [R]. 长春：吉林省交通科学研究所，2023.
[3] 刘越，丁园园，王娜. 高速公路改扩建项目建设现状与趋势 [J]. 工程建设，2015，47(05):53-57.
[4] 仲浩然，闫见华，冉衡等. 新技术和新材料在高速公路改扩建工程中的应用 [J]. 居业，2024(08):222-223.
[5] 杨国峰，马璐，唐胜传. 面向交通强国的高速公路改扩建新理念思考 [J]. 公路交通技术，2023，39(06):1-5.
[6] 黄炎. BIM技术在公路改扩建设计中的应用 [J]. 中外公路，2022，42(06):255-259.