

高原高寒地区碳纤维加热线抗凝冰沥青路面 技术研究与应用

胡雪莲, 廖东博, 高翔, 文雨

四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都

收稿日期: 2025年5月25日; 录用日期: 2025年6月17日; 发布日期: 2025年6月27日

摘要

针对高原高寒地区沥青道路冬季结冰严重、传统抗凝冰方法效率低且污染大等问题。本文以久马高速公路为依托, 研究碳纤维加热抗凝冰沥青路面技术的应用效果。通过埋设碳纤维发热线, 结合隔热保温层与精细化施工工艺, 验证其导电导热性能及抗凝冰效果。试验结果表明, 碳纤维发热线可将电能高效转化为热能, 使路面温度均匀提升至冰点以上, 显著延迟结冰时间并降低冰层增厚速度。经检测可知, 碳纤维发热线电阻偏差小于5%, 温度波动范围4.7℃~5.3℃, 路面弯沉值满足设计要求($\leq 30 \times 0.01$ mm)。这表明该技术可以有效地解决高原高寒地区道路结冰问题, 兼具环保性和高效性, 为类似地区交通建设提供了一些新的思路, 但长期稳定性和成本优化仍需进一步研究。

关键词

碳纤维加热, 抗凝冰技术, 沥青路面, 道路安全

Research and Application of Carbon Fiber Heating Anticoagulant Ice Asphalt Pavement Technology in High-Altitude and Cold Regions

Xuelian Hu, Dongbo Liao, Xiang Gao, Yu Wen

Sichuan Provincial Transportation Construction Group Co. Ltd., Chengdu Sichuan

Received: May 25th, 2025; accepted: Jun. 17th, 2025; published: Jun. 27th, 2025

Abstract

In response to the serious winter icing of asphalt roads in high-altitude and cold regions, as well as

文章引用: 胡雪莲, 廖东博, 高翔, 文雨. 高原高寒地区碳纤维加热线抗凝冰沥青路面技术研究与应用[J]. 土木工程, 2025, 14(6): 1576-1583. DOI: 10.12677/hjce.2025.146170

the low efficiency and high pollution of traditional anti icing methods. This article is based on the Jiuma Expressway and studies the application effect of carbon fiber heating anticoagulant ice asphalt pavement technology. By burying carbon fiber heating wires and combining them with thermal insulation layers and refined construction techniques, the electrical and thermal conductivity as well as anti icing effect are verified. The experimental results show that the carbon fiber heating wire can efficiently convert electrical energy into thermal energy, uniformly raise the road surface temperature above freezing point, significantly delay the freezing time, and reduce the rate of ice layer thickening. According to testing, the deviation of the carbon fiber heating wire resistance is less than 5%, the temperature fluctuation range is $4.7^{\circ}\text{C}\sim 5.3^{\circ}\text{C}$, and the road surface deflection value meets the design requirements ($\leq 30 \times 0.01 \text{ mm}$). This indicates that the technology can effectively solve the problem of road icing in high-altitude and cold regions, with both environmental friendliness and efficiency, providing some new ideas for transportation construction in similar areas. However, further research is needed for long-term stability and cost optimization.

Keywords

Carbon Fiber Heating, Anti Coagulation Ice Technology, Asphalt Pavement, Road Safety

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概述

随着我国西部经济快速发展,为完善推动西部资源开发与产业布局,交通基础建设是其先行保障。久马高速公路作为连接成都平原经济区、阿坝藏区羌区和青海省的重要组成部分,加强了黄河流域与长江经济带等地的互联互通。作为高原高寒地区高速公路,其长年气温极低,年平均气温为 4°C 左右,冬季极端低温可达零下二三十摄氏度。昼夜温差大,日间太阳辐射强烈,温度升高,夜晚气温骤降,可达 20°C 以上的温差。降雪量大且积雪期长,部分地区积雪厚度可达数十厘米,积雪时间长达数月。同时,该地区多大风天气,风力强劲,加速路面热量散失,增加了道路结冰的风险。传统的撒盐融雪、机械除冰等方法存在环境污染、腐蚀路面、效率低下等弊端[1][2]。也有相关研究通过植物提取物或废橡胶、钢渣等再生材料替代盐类[3][4],但难以满足该地区道路抗凝冰的实际需求。碳纤维作为一种新型纤维材料,其具有高强度、高模量、环保及良好的导电导热性以及化学稳定性等优异特性[5]。因此,本文以久马高速公路为依托,通过在试验段埋设碳纤维发热线,研究其在沥青路面抗凝冰技术中的应用效果。解决高原高寒地区道路结冰问题,减少其他抗凝冰方法带来的负面效应,为高原高寒地区道路抗凝冰提供了新的技术思路。

2. 碳纤维加热抗凝冰技术原理

碳纤维是一种由有机纤维在高温环境下碳化制成的高性能材料,具有优异的导电和电热转换性能。其机理建立在其独特的物理特性之上。碳纤维具有优异的导电性,当有电流通过时,根据焦耳定律 $Q = I^2Rt$ (其中 Q 为热量, I 为电流, R 为电阻, t 为时间),电子在碳纤维内部运动与原子发生碰撞,产生焦耳热。产生的热量通过热传导的方式,从碳纤维传递至与之紧密接触的路面结构层材料,如沥青混凝土等。同时,部分热量以热对流的形式与周围空气进行热量交换,还有一部分以热辐射的方式向周围环境散发。这些热量通过热传导逐渐传递到路面表面,使路面温度升高,从而实现积雪和冰层的融化[6][7]。为高原

高寒地区的沥青路面提供稳定、高效的抗凝冰保障，确保道路在冬季恶劣天气下的安全畅通。碳纤维发热线埋设路面结构示意图如图 1 所示。

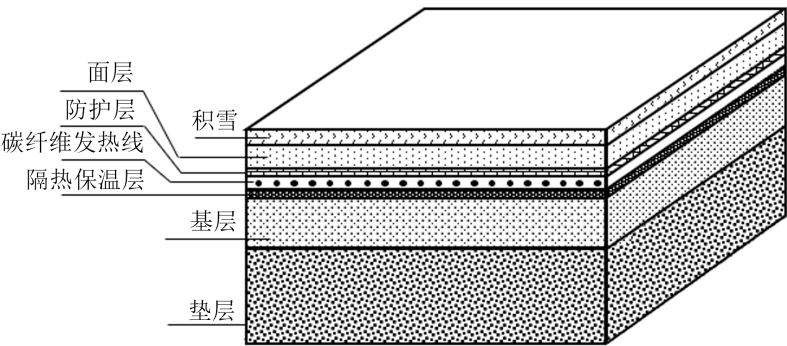


Figure 1. Schematic diagram of buried carbon fiber heating wire pavement structure
图 1. 碳纤维发热线埋设路面结构示意图

3. 碳纤维加热抗凝冰沥青路面施工技术

为验证碳纤维发热线在沥青路面抗凝冰技术中的实际应用效果，进行了试验段铺设。具体铺设流程如图 2 所示。

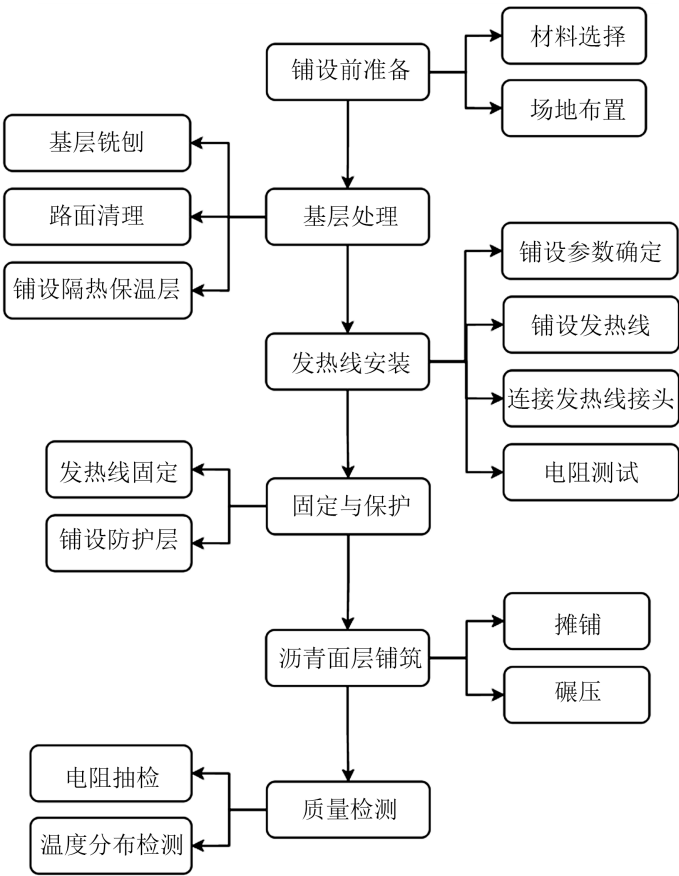


Figure 2. Process diagram for laying carbon fiber heating wire
图 2. 碳纤维发热线铺设流程图

3.1. 铺设前准备

1) **碳纤维加热系统材料选择：**本次试验段铺设选用的碳纤维发热线为直径 4 mm、电阻值 12 Ω·m 的碳纤维发热线。其拉伸强度大于 4500 MPa，确保在复杂施工环境中，如受到拉扯、弯折等外力作用时及长期使用过程中，都能保持结构完整不易损坏，让加热系统具有更好的稳定性和可靠性。温度传感器选用为精度±0.2℃的传感器，湿度传感器选用为精度±3% RH 的传感器。高精度的传感器能够准确测量路面的温度和湿度信息，为加热系统的精确控制提供数据支持，以便根据实际环境条件调整加热功率，实现节能和高效的加热效果。电源控制系统选用为能实现 0~10 A 电流稳定输出的，可根据不同工况下的加热需求，精确调节输出电流，为碳纤维发热线提供稳定的电力供应，确保发热线能在不同环境条件下正常工作，满足路面加热的各种要求。

2) **场地布置：**在试验段施工现场选择地势较高、排水良好的区域作为材料堆放区，对该区域地面进行全面硬化处理。在混凝土硬化层之上铺设一层厚度为 5 mm 的防潮塑料布作为防潮层，防止碳纤维发热线等材料受潮影响性能。为避免发热线受到挤压变形，采用专用的货架进行存放，每摞发热线的堆放高度不超过 1.5 米。在施工前，对发热线铺设设备，检查传动部件是否灵活、链条是否松动、电气控制系统是否正常。对裁剪设备的刀具进行检查，确保其锋利度和切割精度。对检测仪器进行校准，确保检测数据的准确性。同时，检查设备的外观是否有损坏、变形等情况，如有问题及时进行修复或更换。对电源控制系统进行调试，检查其电流调节功能是否正常，能否根据不同的加热需求为碳纤维发热线提供稳定的电力供应。

3.2. 基层处理

铺设碳纤维发热线前，对路面基层进行铣刨处理，使基层平整度误差控制在±5 mm 以内。铣刨完成后，对路面基层进行清理，清除基层表面的所有杂物。为减少热量向基层传递，选择在基层与碳纤维发热线之间增加一层隔热保温层铺，材料选为聚苯乙烯泡沫板，厚度为 50 mm。相比其他材料聚苯乙烯泡沫板具有较低的导热系数，能有效阻止热量向基层传递。且化学性质稳定，不易在使用过程中发生变质、腐烂等情况，能保证隔热保温层在长期使用中性能稳定，具有较长的使用寿命。并对其隔热效果进行测试。测试结果显示该隔热保温层可使热量向基层传递减少约 40%，有效提高了加热效率。测试结果见图 3。

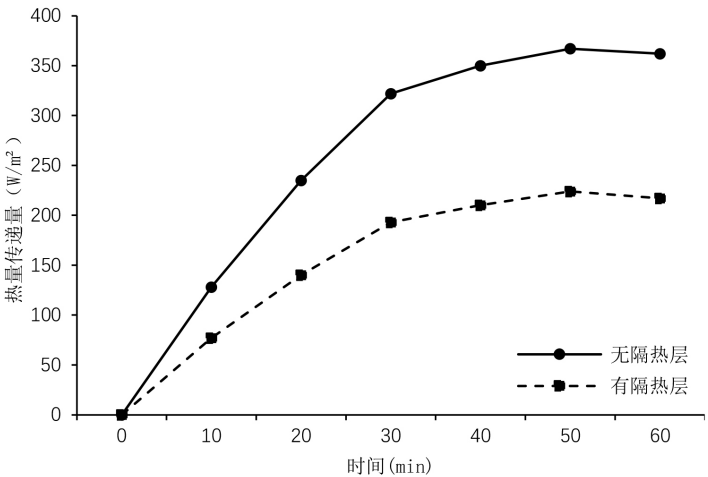


Figure 3. Test results of the influence of thermal insulation layer on heat transfer
图 3. 隔热保温层对热量传递影响测试结果

3.3. 碳纤维发热线安装

通过前期研究分析为使热量均匀分布在路面,避免局部过热或过冷,保证整个路面的加热效果一致,发热线间距设计为 150 mm。这样的间距可在满足加热需求的前提下,合理控制发热线的使用量,降低成本,也便于施工操作,确保发热线铺设均匀。埋深设计为 30 mm,这样的埋深可使发热线得到有效保护,避免因外力作用而受损,延长发热线的使用寿命。且能让发热线在隔热保温层的作用下,更好地将热量传递到路面,减少热量散失,提高热效率。同时,这个深度也符合工程施工中对于结构稳定性和安全性的要求,不会因埋深过浅影响路面结构,或因埋深过深导致热量难以传导至路面。发热线采用专用铺设设备将其均匀铺设在隔热保温层上,保证发热线顺直,避免扭曲和打结。在发热线接头处,采用焊接工艺进行连接,并进行双重绝缘密封处理,防止水分和杂质侵入。经电阻测试,接头电阻与发热线本体电阻偏差小于 3%,保证了导电性能的稳定。

3.4. 固定与保护

使用固定钉以 500 mm 的间距将发热线固定在隔热保温层上,防止其在施工过程中移位。在发热线上方铺设 10 mm 厚玻璃纤维格栅加 30 mm 厚的细粒式沥青混凝土作为防护层。玻璃纤维格栅具有较高的强度、抗拉伸性能及良好的柔韧性,能有效抵抗来自路面的各种应力,可以适应路面的变形和不均匀沉降,与发热线及隔热保温层紧密贴合,防止发热线因外力作用而被拉伸、变形或损坏。且较好的耐腐蚀性,能抵御外界环境中水分、化学物质等的侵蚀,延长发热线的使用寿命。细粒式沥青混凝土能更好地填充玻璃纤维格栅与发热线之间的空隙,形成均匀、密实的结构,有效保护发热线。且在施工过程中更容易控制平整度和压实度,能够保证路面的平整度和压实度符合要求。同时也能更好地固定发热线和玻璃纤维格栅,防止其在车辆荷载作用下发生位移或损坏。

3.5. 沥青面层铺筑

1) 摊铺作业:摊铺方式采用两台摊铺机梯队作业进行沥青混合料摊铺,这样的方式可以保障摊铺的连续性与路面整体性,大幅降低纵向施工接缝的出现几率。根据前期路面结构设计及对发热线的保护,摊铺厚度被精准控制在 60 mm (± 3 mm),保证既能充分覆盖发热线,又能满足路面结构强度和使用性能的要求。摊铺速度严格控制在 2~3 m/min,目的是在于规避摊铺机直接碾压发热线。这一限制有效降低了施工机械对发热线的破坏风险,是普通沥青摊铺作业中无需重点考量的因素。

2) 碾压作业:初压:在 150℃~160℃的温度区间进行,这个温度下沥青混合料具有良好的流动性。使用双钢轮压路机静压 1~2 遍。双钢轮压路机凭借其刚性轮面,能对摊铺后的沥青混合料进行初步压实,稳定路面形状。复压:当温度降至 130℃~140℃时开展复压,此时沥青混合料仍具备一定的可塑性。采用轮胎压路机碾压 3~4 遍,轮胎压路机通过多个充气轮胎与路面接触,形成均匀的压力,可有效消除初压产生的轮迹,使路面更加密实,显著提升压实度。终压:终压温度不低于 110℃。使用双钢轮压路机静压 1~2 遍,使路面更加平整,进一步提高路面的平整度和压实质量,确保沥青面层压实度达到 98%以上,满足路面的使用要求和耐久性标准。本工艺与其他工艺相比对初压、复压、终压的温度范围做出极为精细的规定,不仅为了实现沥青面层压实度达到 98%以上的高标准,更是因为发热线的存在。不合理的碾压温度可能导致发热线周围沥青混合料的压实状态异常,进而对发热线造成挤压、拉扯等损害。

4. 电气系统安装与调试

1) 电源系统安装:碳纤维发热线的总功率为 300 kW,根据此功率安装一台 400 kVA 的变压器和配套配电箱。电源线路采用 YJV22-10 kV 交联聚乙烯绝缘电力电缆,埋深设置为 800 mm。在电缆敷设完成

后，进行绝缘电阻测试。测试结果显示绝缘电阻值大于 1000 MΩ，满足电气安全要求。

2) 控制系统调试:在路面上均匀布置 30 个温度传感器和 15 个湿度传感器,并将其与控制系统连接。设定温度阈值为 0℃，当系统启动加热后，在 10~15 分钟内，监测数据显示路面温度可升至 2℃~3℃，控温精度达到±0.5℃，能够实现对路面温度的精准控制。

5. 质量检测

1) 发热线性能检测：在试验段铺设完成后，分别在第 1、2、3 周对碳纤维发热线进行电阻检测。每周检测数量为 100 根碳纤维发热线。初始平均电阻值为 12 Ω·m，第 1 周检测结果显示平均电阻值为 12.1 Ω·m，电阻偏差为 0.83%；第 2 周检测结果显示平均电阻值为 12.2 Ω·m，电阻偏差为 1.67%；第 3 周检测结果显示平均电阻值为 12.3 Ω·m，电阻偏差为 2.5%，均未超过 5%。同时，在第 3 周检测试验段温度情况。横向每隔 0.5 米取一个检测点和纵向也每隔 0.5 米取一个检测点，构建一个 11×11 的检测点矩阵(包含 0 米和 5 米处)。检测结果见表 1。

Table 1. Temperature situation of carbon fiber heating wire in both horizontal and vertical directions
表 1. 碳纤维发热线横纵向温度情况

纵向 \ 横向	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
0	5.0	5.1	4.9	5.2	5.0	4.8	4.9	5.1	5.0	4.9	5.0
0.5	4.9	5.0	5.1	4.8	4.9	5.0	5.2	5.0	4.8	5.1	4.9
1.0	5.1	4.8	5.0	5.0	5.2	4.9	5.0	4.8	5.1	4.9	5.0
1.5	4.8	5.0	4.9	5.1	4.9	5.0	4.8	5.2	5.0	5.1	4.8
2.0	5.0	4.9	5.1	4.8	5.0	5.2	4.9	5.0	4.8	5.0	5.1
2.5	4.9	5.1	4.8	5.0	5.2	4.9	5.0	4.8	5.1	4.9	5.0
3.0	5.0	4.8	5.0	5.1	4.9	5.0	4.8	5.2	5.0	4.9	5.1
3.5	4.8	5.0	4.9	4.8	5.1	4.9	5.0	5.0	5.2	4.8	5.0
4.0	5.1	4.9	5.0	5.2	4.8	5.0	4.9	4.8	5.0	5.1	4.9
4.5	4.9	5.0	4.8	5.1	4.9	5.2	4.8	5.0	4.9	5.0	5.1
5.0	5.0	5.1	4.9	4.8	5.0	4.9	5.0	5.1	4.9	5.0	5.0

从表 1 中可知，碳纤维发热线整体发热均匀，温度在 4.7℃~5.3℃之间波动，温度波动较小，热辐射强度的相对均匀性。高于冰点可满足抗凝冰需求，但又不会过高，同时也体现出发热线整体发热均匀的特点。

2) 路面结构强度检测：采用落锤式弯沉仪，每隔 25 米选取一个检测点，共检测 5 个点。检测结果如图 4 所示。

从图 4 可知，实际检测结果在 22~26 (0.01 mm)之间。这表明碳纤维发热线质地轻盈，柔韧性佳，在铺设过程中，不会因自重或外力作用对路面基层和垫层造成过度挤压或破坏，极大减少了施工对路面结构的扰动。而且，碳纤维发热线在运行时，发热均匀稳定，不会导致路面因局部温度过高或过低而产生热胀冷缩变形，避免了对路面基层或垫层结构稳定性的不良影响，因此路面弯沉值维持在较低水平，路面结构强度完全满足使用要求。且满足设计要求路面弯沉值不超过 30 (0.01 mm)。

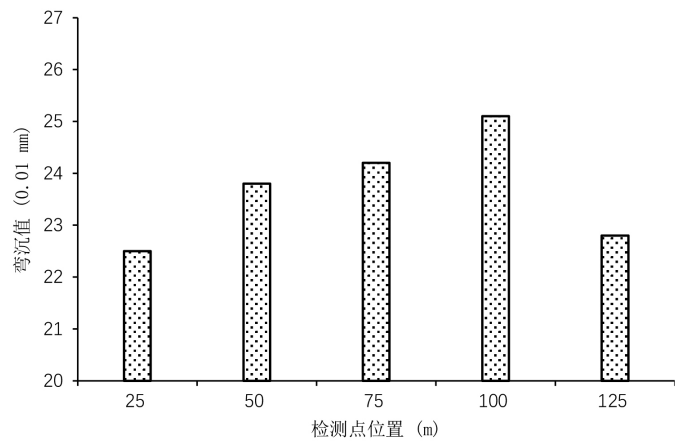


Figure 4. Test section pavement deflection detection results
图 4. 试验段路面弯沉检测结果

3) 抗凝冰效果评估：在试验段投入使用后的首次降雪结冰期间，同步对试验路段和未铺设碳纤维发热线的普通路段进行全方位监测。验证其抗凝冰效果，结果见表 2。

Table 2. Comparison of anti icing effect between experimental section and ordinary road section
表 2. 试验段与普通路段抗凝冰效果对比表

降雪后时间/h	试验段	普通段
1	路面无积雪无结冰	路面开始有积雪，未结冰
2	路面无明显积雪，无结冰	路面积雪压实，开始出现薄冰
3	路面开始出现少量积雪，无结冰	冰层厚度增加约为 0.6 mm
4	冰层厚度约为 0.2 mm，车辆行驶正常	冰层厚度约为 1.8 mm，车辆开始出现轻微打滑
5	冰层厚度约为 0.5 mm，车辆行驶无明显异常	冰层厚度约为 2.6 mm，车辆行驶打滑明显
6	冰层厚度约为 0.9 mm，车辆可正常行驶	冰层厚度约为 3.9 mm，有明显冰凌，路面状况差

从表 2 可知，降雪开始后，团队每隔 1 小时对两个路段的路面状况进行巡检记录，利用激光测厚仪，每小时对冰层厚度进行精确测量。监测数据显示，普通路段在降雪后 2 小时左右，路面便开始出现结冰现象；试验路段则在降雪 4 小时后才开始结冰，对比路段晚 1~2 小时。普通路段的冰层厚度增长迅速，每小时平均增厚约 1.1 mm；试验路段冰层厚度增长缓慢，每小时仅增厚约 0.35 mm。这表明试验路段的抗凝冰效果得到显著提升，不仅结冰时间进一步延迟，冰层厚度增长速度也大幅降低。

6. 结论

本文依托久马高速开展碳纤维加热抗凝冰沥青路面技术研究，得出以下结论：

1) 碳纤维凭借其出色的导电和电热转换性能，在沥青路面中埋设发热线后，能将电能高效转化为热能，有效提升路面温度，实现积雪和冰层的融化，为高原高寒地区沥青路面抗凝冰提供了可靠的技术路径；

2) 从材料选择、场地布置到各施工环节，如基层处理、发热线安装、固定保护以及沥青面层铺筑等，都提出了明确且合理的施工参数与技术要求。这些措施保证了施工质量，使碳纤维发热线能在路面结构中稳定发挥作用，同时确保路面的结构强度和使用性能不受影响。

3) 经后期检测发现碳纤维发热线电阻偏差在合理范围内, 发热均匀温度波动小, 热辐射强度相对均匀, 既能满足抗凝冰需求, 又不会对路面造成不利影响。电气系统安装调试后, 能精准控制路面温度, 满足设计要求。与普通路段相比, 试验路段结冰时间延迟 1~2 小时, 冰层厚度增长速度大幅降低, 每小时仅增厚约 0.35 mm, 有效提升了道路在冬季恶劣天气下的安全性和通行能力。

综上所述, 该技术可以解决高原高寒地区道路结冰问题, 减少传统抗凝冰方法带来的环境污染、腐蚀路面等负面效应, 为高原高寒地区道路抗凝冰提供了新的技术思路。但在大规模应用前, 仍需进一步研究其长期稳定性和成本优化问题, 以更好地服务于高原高寒地区的交通建设。

参考文献

- [1] 郭猛, 蔡晓晓, 王京京, 等. 道路融雪除冰技术生命周期内环境负荷分析[J]. 中国公路学报, 2024, 37(9): 186-196.
- [2] 刘毅豪. 城市道路沥青路面融雪剂损害研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南大学, 2019.
- [3] 杨若禺. 钢渣沥青混合料微波加热除冰仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2024.
- [4] 庞登东, 乌云毕力格, 周鹏飞. 环保型融雪剂对道路材料性能的影响研究[J]. 四川水泥, 2024(10): 235-237+240.
- [5] 韩朝锋, 薛有松, 张东生, 等. 碳纤维复合材料电导特性和力电耦合行为研究进展[J]. 复合材料学报, 2023, 40(6): 3136-3152.
- [6] 王业文, 董洁, 孙润军, 等. 碳纤维电加热元件最新研究进展[J]. 高科技纤维与应用, 2023, 48(6): 18-25.
- [7] 左连滨. 碳纤维发热线在桥面融冰化雪中的应用技术研究[J]. 绿色环保建材, 2021(6): 7-8.