

寒区道路桥梁融雪除冰技术研究综述

唐丽云¹,邵海涛¹,唐华明²,邱培勇¹,杜晓奇¹,张蕾¹,彭惠³

(1.西安科技大学建筑与土木工程学院,陕西西安 710054;2.乌鲁木齐恒信民生建筑安装有限公司,新疆乌鲁木齐 830000;
3.中交第一公路勘察设计研究院有限公司,陕西西安 710075)

摘要:道路桥面的融雪除冰对车辆行驶安全至关重要,但是目前对于融雪除冰技术的研究主要集中在工程效果及技术评价上,尚未从除冰工作机理进行对比分析和系统阐述。该文基于融雪除冰机理将融雪除冰技术分为被动式除冰技术、主动融雪除冰技术以及能量利用型融雪除冰技术3类,并对其进行归纳总结。系统评价了融雪剂除冰法、机械除冰法两项传统除冰手段的优缺点;探讨了抑制类冻结铺装路面、相变材料路面两项主动融雪除冰技术,并提出相变材料用于路面融雪除冰具有绿色环保价值;介绍了不同能量利用型融雪除冰技术的应用机理。深入分析现有的道路除雪技术及其实际应用效果和存在的问题,以期对寒区道路桥梁冬季融雪除冰研究提供基础性支撑。

关键词:道路桥梁;融雪除冰;被动除冰技术;主动除冰技术;导电混凝土;电缆加热路面

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

Review of Snow and Ice Melting Techniques for Road and Bridge in Cold Regions

TANG Liyun¹, SHAO Haitao¹, TANG Huaming², QIU Peiyong¹, DU Xiaochi¹, ZHANG Lei¹, PENG Hui³

(1.School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2.Urumqi Hengxin Minsheng Construction and Installation Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 830000, China;

3.CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Abstract: Snow and ice melting of road and bridge surfaces is crucial for traffic safety, but current research on snow and ice melting techniques mainly focuses on engineering effects and technical evaluation, without the analysis and elaboration from the perspective of their mechanisms. To this end, based on the different mechanisms, this study divided snow and ice melting techniques into three types and summarized them: passive deicing, active deicing, and energy utilization deicing. This study systematically evaluated the advantages and disadvantages of traditional deicing methods such as deicing agents and mechanical deicing, analyzed two active deicing techniques, namely inhibitive freezing pavement and phase change material pavement, discussed the environmental-friendly method for road deicing by using phase change materials, and introduced the mechanisms of different energy utilization deicing techniques. This study analyzed the existing road deicing techniques, their actual application effects, and existing problems, to provide foundational support for the research of snow and ice melting on roads and bridges in cold regions.

Keywords: road bridges; snow and ice melting; passive deicing technique; active deicing technique; conductive concrete; cable-heated pavement

0 引言

高寒气候下,道路桥梁积雪结冰现象导致车辆运行安全性大幅降低。有学者对于冰雪天气下的事

故发生率进行调查分析,结果表明:当路面状况分别为干燥、湿润、雪层、成冰的情况下,发生事故的概率分别为1.5%、3.0%、8.0%、13.0%,后3种不良天气下的事故率为正常情况的2.0、5.3、8.7倍^[1]。瑞典研

收稿日期:2024-09-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:42271144)

作者简介:唐丽云,女,博士,教授.E-mail:tangly@xust.edu.cn

研究者经调查统计得出,当道路处于冰雪覆盖情况时,发生事故的可能性为干燥情况的5~10倍,人员伤亡的概率是干燥情况下的2~5倍^[2]。因此,归纳总结现有融雪除冰技术并揭示其工作机理对寒区交通领域实现快速高效的融雪除冰至关重要。

目前国内外采用的融雪除冰技术按工作机理可分为被动式、主动式以及能量利用型3类。其中,被动式融雪技术是指通过人力或机械手段来达到融化积雪和去除冰层的效果,包括融雪剂除冰^[3]和机械除冰;主动式融雪除冰技术是指在传统路面中添加低冰点材料或弹性材料,使得路面在车辆荷载或温度变化下抑制路面结冰的方法,主要包括抑制冻结类铺装路面^[4]和相变材料路面^[5];能量利用型融雪除冰技术是指利用太阳能、地热能以及电能通过加热管道流体或者电缆线放热达到融雪除冰的技术,主要包括太阳能-地热能融雪除冰技术^[6]、能量桩桥面融雪除冰系统^[7]以及电力融雪化冰技术^[8]。各类融雪除冰技术在路面中的广泛使用显著提升了寒冷气候下的道路行车安全。然而,目前对于现有融雪除冰技术工作原理的系统性梳理还不够充分,对于技术优劣性的评价不够完整,使得各类融雪除冰方法的应用工况没有规范性。因此,综述整理现有融雪除冰技术机理对不同工程背景下的技术优劣及适用性

进行系统总结对实际工程具有重要意义。

本文基于国内外学者的研究成果,从除冰工作机理、材料特性及路用性能出发,系统总结被动、主动以及能量利用型融雪除冰技术,提出了各类融雪除冰技术现有不足及未来研究方向;从融雪性能、节能环保及运营费用出发,被动、主动以及能量利用型融雪除冰技术,可为各类融雪除冰技术在实际工程中的实施提供指导帮助,同时对新型绿色节能除冰技术进行探讨和展望,以期指明寒区道路桥梁冬季融雪除冰技术未来发展方向。

1 被动式除冰技术

1.1 机械除冰

机械除冰法是迄今为止最传统的融雪除冰方法,虽然在具体工作过程中往往受路面状况、雪层薄厚、气温等条件的限制^[9],但依然是清除重点、难点路段冰雪最直接有效的方法。除雪机种类繁多,根据其工作原理划分为5种类型:推移式、螺旋转子式、滚压式、铲刮式和锤击式^[10],每种类型机械的工作原理及其优缺点见表1。此外,根据除雪机的应用场景,分为通用型、人行道专用型、铁路专用型和高速公路专用型,根据底盘设计的不同,除雪机则分为专用底盘除雪机和多功能底盘除雪机两种类型。

表1 除雪机工作原理及优缺点

Table 1 Working principle and advantages and disadvantages of snow removal machines

除雪机类型	工作原理	优点	缺点
推移式	通过推雪板切割和推移路面冰雪	直接有效、对路面友好	难清除道路薄冰、高能耗、噪声大
螺旋转子式	通过多个螺旋形转子切割、收集和抛掷积雪	效率高、具有抛雪功能	高能耗、损伤路面、噪声大
滚压式	通过物理压力和摩擦力除雪	适用于密实雪、耐用性强、构造简单	损伤路面、高能耗、噪声大、效率受限
铲刮式	通过刮刀直接切割或刮除路面冰雪	强力清除、多功能性、结构坚固	损伤路面、噪声大
锤击式	通过多个高速旋转的锤头击碎路面冰雪	高效破碎、适用性强	损伤路面、噪声大、能耗高

由表1可以看出:不同类型的除雪机基本存在工作期间噪声大、能耗高,以及对路面造成损伤等缺点。因此,针对除雪机作业过程中的诸多缺点,相关学者在旧除雪机改进,新除雪机研制方面做了大量试验与理论研究。为了改进以上除冰机械的破冰性能,Liu等^[11-12]、王剑英等^[13]通过微波加热原理[式(1)]来消除冰层与路面间的黏结力并设计出微波除冰机原理图(图1),解决了以往除冰机械对路面的损伤问题。表2为微波除冰过程中物质的相对介电常数和介质损耗角正切值;刘长生^[14]针对南方地区冻雨后

形成的冰层特点,通过对振动式除冰滚筒、除冰羊角、振动液压系统和振动轴等装置反复设计和计算,成功解决了冻雨后冰层与路面紧密粘连难以清除的问题;朱自成等^[15]提出了一种综合热力融冰、水射流切割和机械除冰3种技术的复合除冰方案,实现了这3种方法的有效融合。目前,世界上冬季降雪国家正面临对于除冰机械的改进以及性能优越的除冰机械的研制这一重要课题^[9]。

$$P = 0.556f_e' \tan(\delta) E^2 \times 10^{-12} \quad (1)^{[13]}$$

式中: P 为微波功率; f 为微波工作频率; ϵ' 为相对介电常数; δ 为介质损耗角; E 为微波电场强度的有效值^[16]。

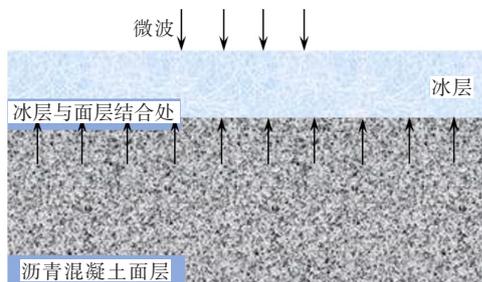


图1 微波除冰原理^[13]

Figure 1 Principle of microwave deicing^[13]

表2 物质的相对介电常数和介质损耗角正切值^[13]

Table 2 Relative permittivity and dielectric loss tangent of a material^[13]

介质	相对介电常数	介质损耗角正切
水	76.7	0.157 0
冰	3.2	0.000 9
沥青混凝土	4.5~6.5	0.015 0~0.036 0

1.2 融雪剂除冰

融雪剂除冰是冬季降雪地区使用最广泛的一种融雪除冰技术。它主要分为含氯盐类、不含氯盐类和混合型3种类型,其核心机制是通过降低雪水的蒸汽压力,进而降低雪水的冰点^[17]。融雪剂自开发以来一直沿用至今,多项实际案例证明了融雪剂应用于道路融雪的方便快捷性,然而,大规模使用融雪剂可能会对道路桥梁、邻近建筑物以及周围环境带来严重的负面影响。

从20世纪30年代起,国际上便开始使用融雪剂来清除积雪,氯盐类融雪剂使用最广,主要包括氯化钠、氯化钙和氯化钾,其中氯化钠使用最为广泛。除了氯盐类,乙酸镁钙和尿素等非氯盐类融雪剂也有所应用,不过,由于效率较低、用量大和成本较高,非氯盐类融雪剂并未得到广泛使用^[1]。中国最初使用的融雪剂以氯化钠为主,2000年以后其他各类氯盐融雪剂才得以大量应用,而且在最初几年使用量增幅明显^[18]。最近几年,氯盐类融雪剂因其对路面材料、建筑物以及植物造成严重的腐蚀,不符合环保的要求,使用量已经受到限制。研究表明:经常使用氯盐类融雪剂的桥梁结构可能在10~15年内遭受严重破坏,这也是威胁道路和桥梁安全的主要原因之

一^[9]。有研究表明每使用1 t融雪剂带来的损失包括:615美元道桥腐蚀损失、113美元车辆腐蚀损失和75美元植物腐蚀损失^[19]。

为了减少传统融雪剂对道路的破坏,众多研究人员致力于开发环保的新型融雪产品,郭金禹等^[20]研发了一种复合型缓蚀剂,显著降低了氯化钙对钢筋和混凝土的腐蚀同时保证了氯化钙的融雪化冰效果,是一种高效的防腐蚀融雪材料;许英梅等^[21]以可生物降解且成本较低的木醋液以及醋酸钙镁盐为原料,研制了一种经济且高效的低碳混合羧酸钙镁融雪剂,并对其融雪过程开展了一系列研究,结果表明:使用低碳混合羧酸钙镁盐作为融雪剂,不仅在低温条件下能有效融雪,而且对金属和植物的损害相对较小,其综合性能优于传统氯盐类融雪剂;林永波等^[22]制作了一种显色环保型融雪剂,显著降低了对于钢筋、道路和植物的腐蚀。其在融冰过程中,颜色会从淡粉色逐渐过渡到粉红色,随后颜色逐渐变浅,直至透明。这一颜色变化的特性可以使融雪剂的使用量得到控制;郑武西等^[23]通过建立融雪剂撒布量、冰雪厚度、环境温度的模型[式(2)],分析天气情况和环境温度对融雪剂撒布量和撒布速度的影响[式(3)],减少了融雪剂的使用量,降低了融雪剂对环境的污染,式(2)、(3)中路面积雪的厚度 h 具体取值见表3。因此,现阶段学者们对于融雪剂的研究主要倾向于研发一种绿色环保的新型融雪剂,即在保证高效的融雪效率的前提下,如何减少对于路面结构的腐蚀以及降低对环境的损害。

$$m = S\rho h \cdot \frac{(-0.23 + \sqrt{-0.0082(t-1) + 0.0525})}{1.23 - \sqrt{-0.0082(t-1) + 0.0525}} \quad (2)$$

$$v = \frac{60m_1(-0.23 + \sqrt{-0.0082(t-1) + 0.0525})}{S\rho h(-0.23 + \sqrt{-0.0082(t-1) + 0.0525})} \quad (3)$$

式中: m 为撒布在一定面积路面上融雪剂的质量; S 为融雪剂撒布面积; ρ 为冰或雪的密度; h 为路面上冰或雪的厚度; t 为外界温度; m_1 为撒布车一定档位下出料口每分钟出料量; v 为撒布车撒布融雪剂时的行驶速度。

表 3 不同天气情况下路面结冰或雪的厚度^[24]Table 3 Thickness of ice or snow on roads under different weather conditions^[24]

天气情况	实际路面冰雪厚度/ cm	h [按式(2)、(3)计算时 所取冰雪厚度]/cm
结冰	≤ 0.2	0.2
微雪	≤ 3.0	3.0
小雪	(3,6]	6.0
中雪	(6,12]	12.0
大雪	(12,20]	20.0
特大雪	> 20.0	25.0

2 主动式融雪除冰技术

主动式融雪除冰技术是指在原有路面材料基础上添加低冰点材料和弹性材料以达到融雪除冰的目的。这项技术通过采用路面建设新方法和新型材料,使路面具备自我融雪和化冰的功能,从而有效提升了冬季路面的运行安全性,且相对于被动融雪除冰技术具有更高的效率和环保性,解决了传统被动融雪除冰技术造成的环境污染以及交通堵塞问题,因此,被广大学者所关注。目前道路主动融雪除冰技术主要包括抑制冻结类铺装路面和相变材料路面。

2.1 抑制冻结类铺装路面

抑制冻结类铺装路面分为化学类铺装路面、物理类铺装路面两大类^[4]。表4为抑制冻结铺装路面优缺点及示意图。化学铺装路面技术是指在路面材料中添加一定比例的防冻化学剂,如氯化钠、氯化钙等盐类物质。在毛细作用和车辆压力的影响下,路面中的盐分慢慢释放降低路面水分的冰点,从而减缓积雪和冰层的形成。物理铺装路面技术通过在路面直接铺设或填充弹性材料,利用车辆行驶时产生的不均匀压力破碎路面的冰层,从而达到除冰效果。

目前,学者们开展了大量关于化学类抑制冻结铺装路面的研究(表5)。瑞士学者将抗凝冰剂 Verglimit-260(V-260)首次掺入到沥青混合料中并用来铺设路面^[25]。20世纪70年代末日本学者将自主研发的融雪抑冰材料 Mafilon(MFL)铺设于沥青路面中^[26]。Chen等^[27]制备了一种以醋酸钠、醋酸钙以及醋酸钾为主要成分的生态环境保护型融雪剂,并以代替矿粉的方式掺入路面材料中开发一种主动除雪和具有缓释功能的微面层材料,最终结果表明醋酸钠、醋酸钙以及醋酸钾的最佳比例为 37:15:48;张争

表 4 抑制冻结铺装路面优缺点及示意图

Table 4 Advantages and disadvantages of anti-icing paved surfaces and schematic diagrams

抑制冻结类铺装路面	化学类铺装路面	物理类铺装路面
优点	可以实现自动融雪、减少人工撒盐的工序	提高路面摩擦性,增加除冰性能
缺点	盐化物析出路面破坏环境	损毁路面结构平整度、降低路面冻融劈裂强度
示意图		

奇等^[26]为了改善融雪抑冰沥青混合料的路用性能,对融雪化冰材料的工作原理、评估手段、分类及使用效果进行了综述,并深入分析了这类材料在提升沥青混合料的冰雪清除能力及道路使用性能方面相较于传统沥青路面的优势。同时,指出通过使用高弹性改性沥青或加入抗剥离剂、聚酯纤维等辅助材料,能够显著优化融雪化冰沥青混合料的路用性能;俞文生等^[28]为解决冬季路面结冰带来的行车安全问题,提出了高弹自应力除冰和盐化物降冰点相结合的除冰雪路面技术,研制了一种具有高弹性的储盐沥青混合材料,能够高效去除 12 mm 厚的冰层,保障冬季冰雪条件下的行车安全。

物理类铺装路面由于橡胶等弹性材料的加入使得其抗滑性能、抑制结冰性能较沥青路面均有所提升。Meng等^[35]通过表面振动压实试验研究了不同初始级配砾石颗粒在动态荷载下的物理性能,建立了破碎参数与粒度之间的经验关系;Zhong等^[36]开发了一种含有 Mafilon(MFL)、橡胶颗粒(RP)和高黏度沥青(HVA)的高弹性/储盐沥青混合料(HESAM),并通过融雪效果试验、轮胎除冰试验以及时间有效性试验验证了其融雪性能、路用性能均优于普通沥青混合料;肖劲松等^[37]将橡胶颗粒沥青混合料除冰技术与盐化物融雪沥青混合料除冰技术相结合,旨在研发一种新型的环保型物理-化学融雪除冰沥青混合料;Zou等^[38]用橡胶颗粒按质量替代细集料、用自行开发的储盐材料按体积代替矿粉制备高弹性储盐沥青混合料(HESS),通过降雨模拟试验以及落球

冲击试验,验证了HESS的路用性能,结果表明:高温稳定性和低温抗裂性较普通沥青混合料有改善,抗水损能力严重降低。陈建民等^[39]、Huang等^[40]、张晓

亮^[41]、张洪伟^[42]、张聪^[43]研究了橡胶颗粒对沥青混合料路面路用性能的影响,具体结果见表6物理类铺装路面材料性能评价。

表5 常用化学类铺装路面材料及性能

Table 5 Common chemical paving materials and their performance

材料	掺量(骨料质量)/%	适应环境温度/°C	融雪除冰性能	路用性能		
				高温性能	低温抗裂性能	水稳性能
V-260 ^[29]	5~6	-20~0	良	提高	下降	下降
Mafilon (MFL) ^[30-31]	6~8	-10~0	良	下降	下降	下降
ZG-10S、RAA ^[32]	5	-7~0	良	下降	下降	下降
IGD ^[33]	5	-20~0	良	提高	下降	下降
生态环境保护型融雪剂 ^[27]	50(矿粉掺量)	—	良	下降	下降	下降
环保型融雪剂 ^[34]	1~3	—	良	下降	下降 </td <td>下降</td>	下降

表6 物理类铺装路面材料性能评价

Table 6 Performance evaluation of physical paving materials

作者	材料	试验方法	路用性能
陈建民等 ^[39]	橡胶颗粒沥青混合料	车辙试验	动稳定度在橡胶颗粒含量增加至3%时达到峰值,之后随着颗粒含量的继续增加而逐渐降低
Huang等 ^[40]	橡胶颗粒沥青混合料	低温弯曲试验	低温弯拉破坏应变随橡胶颗粒掺量的增加逐渐增大
张晓亮 ^[41]	橡胶颗粒沥青混合料	浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验	橡胶颗粒掺量增大水稳性增强
张洪伟 ^[42]	熟石灰+水泥+橡胶颗粒沥青混合料	浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验	1%熟石灰+1%水泥改善橡胶沥青水稳性效果最好
张聪 ^[43]	橡胶颗粒沥青混合料	飞散试验	抗飞散性能差

综上所述,化学类铺装路面可以显著提高路面融雪化冰效率,改善冰雪天气下路面行车安全,但是会造成路面水稳性能、低温抗裂性以及高温稳定性等性能下降,为路面病害发生留下隐患^[27,34],对于抑冰材料加入导致的路用性能降低这一问题后续还有待进一步研究。物理铺装路面技术相对于传统的融雪化冰技术具有优异的经济性和良好的融雪化冰效果,在清除路面覆冰的同时提升了路面的抗摩擦性能,但是随着后期橡胶材料从路面表面脱落,严重破坏路面完整性,降低了耐久性。

2.2 相变材料路面

相变材料(Phase Change Materials,简称PCM)是一类在固、液、气三相转换时,通过吸热和放热来储存和释放能量的物质。随着工程建筑领域绿色节能化的提出,越来越多的PCM被应用到工程建筑中。PCM在工程中的应用主要倾向于建筑的墙体,原因是其能够达到冬季保温、夏季隔热的效果,但是也有部分学者通过研究发现低温相变材料也可用于

冬季道路融雪除冰。相变混凝土储放热原理如图2所示^[44-45]。

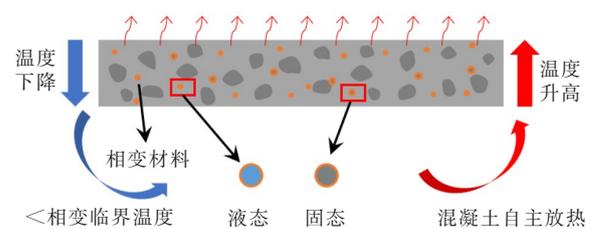


图2 相变混凝土储放热原理^[44-45]

Figure 2 Phase change concrete for thermal energy storage principles^[44-45]

Souayfane等^[46]通过对低温相变材料的应用效果进行总结,提出将相变材料用于道路桥梁融雪除冰的可行性;Athukorallage等^[47]发现在沥青混合料中掺入相变材料能够调节路面的温度变化,这有助于减缓路面升温 and 降温的速度,优化路面表层的温度状况,从而增强沥青路面对环境变化的适应能力;Kakar等^[48]研究发现在沥青路面中添加相变材料可以有效地缓解因温度波动导致的路面收缩与形变,并且将

其作为改性材料能够减少沥青路面的温度相关损害;李莉^[49]对比分析了石蜡、十六烷、十八烷和硬脂酸丁酯等多种相变材料与混凝土混合后的稳定性,结果表明:石蜡和硬脂酸丁酯与混凝土的相容性最好;Hunger等^[50]研究了在混凝土中掺入相变微胶囊对其力学性能和热物理特性的影响,结果显示力学性能随着微胶囊含量的增加而减少,而热物理性质则呈现出相反的趋势;臧初越^[51]通过真空吸附的方式将相变材料吸附于多孔载体材料中,并对多孔材料外层采用乙基纤维素进行包裹制备相变微胶囊,并将其掺入混凝土中以制备相变混凝土,通过相变材料的储热性来提高混凝土的抗冻性,但是并未考虑到相变材料会导致混凝土强度下降这一问题。上述学者的研究成果证实了相变材料用于道路融雪的可行性,但目前所做的大量工作仅基于室内试验和理论分析,对实际工程只能起到理论支撑的作用,后续的研究还需要结合实际工程案例进行更深入地观察和分析。表7为常用低温相变材料。

表7 常用低温相变材料

Table 7 Common low-temperature phase change materials

相变材料种类	相变温度/ ℃	相变潜热/ (J·g ⁻¹)
正十四烷 ^[51]	1.73	163
月桂酸甲酯 ^[51]	1.25	189
石蜡 ^[51]	1.53	202
十二醇-十四烷二元复合相变材料 ^[52]	3~4	-202~-194
癸酸-辛酸二元复合相变材料 ^[53]	2.5	104
5%山梨醇水溶液-0.4%纳米 氧化钛-1%聚丙烯酸钠 ^[54]	-2.90	293.80
51%十四烷-49%正辛酸 二元复合相变材料 ^[55]	0.90	191.50

3 能量利用型融雪除冰技术

3.1 太阳能-地热能融雪除冰技术

太阳能融雪除冰技术指利用太阳能板将太阳辐射转换为电能用于路面融雪除冰加热系统,通过这种方式,太阳能为融雪除冰系统提供了清洁、可再生的能源。太阳能融雪除冰原理图如图3所示。地热能融雪除冰技术指通过地下管道中的热能,利用热泵等技术将热能转移到需要加热的路面区域,实现路面的融雪除冰。

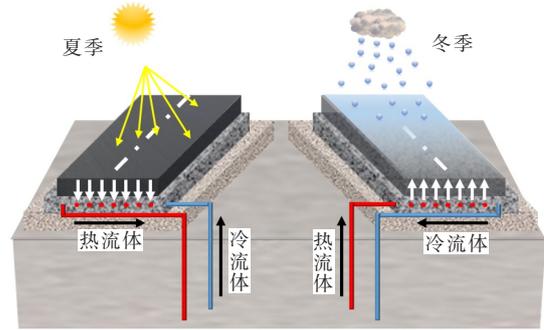


图3 太阳能融雪除冰原理图

Figure 3 Principle of snow and ice melting by solar energy

传统的热力融雪技术在使用中会消耗大量的能源,在当前能源紧缺、气候变暖的大环境下传统的热力融雪技术已不适合大量应用^[5],取而代之的是可再生能源。可再生能源的有效利用,不仅能实现节能减排的目标,还能顺应当前绿色环保的国家战略,对此,不少学者考虑将太阳能以及地热能与道路融雪除冰结合。Han等^[56]提出在混凝土桩中掺入相变材料以实现对其传热性能的改性,并通过建立计算模型验证了相变材料加入混凝土桩中的可行性;Liu等^[57]通过研究地热能源桩在加拿大不同城市的可行性,推出了桥梁热泵性能系数(COP),并解决了由于地热能源桩系统的运行而导致的地面热不平衡问题。最后通过可行性研究,发现地热能源桩融雪效率高、经济性好;Pan等^[58]综述了沥青路面集热器对于太阳能吸收的研究,并提出关于沥青路面施工技术、维护技术以及长期性能的展望;吴定意等^[59]考虑将太阳能用于寒区道路和桥梁的自动融雪技术上;王华军等^[6]运用数值模拟技术,研究了路面融雪系统的热传递特性,并构建了相应的传热模型。通过模型分析,研究了管道埋深和加热温度对融雪效果的影响,探讨了降雪量、环境温度、相对湿度和风速等环境因素与融雪过程中所需热量的关系。

太阳能融雪除冰系统的开发解决了以往融雪除冰技术面临的节能、绿色环保等问题,但是其受日照时间、降雪时长等自然条件的限制,难以大范围推广使用。地热能融雪除冰技术虽效果好,但目前仍存在安装加热管道复杂、受地热源限制问题。因此,实现太阳能与地热能的联合融雪除冰,可以达到优势互补的效果,在未来的研究中具有良好的应用前景。

3.2 能量桩桥面融雪除冰系统

能量桩桥面融雪除冰系统由能量桩埋管换热器和桥面板埋管换热器两部分组成。基于能量桩的桥面融雪除冰技术作为一种新型技术,具有环保、节能等优势^[60]。图4为能量桩融雪除冰系统示意图。

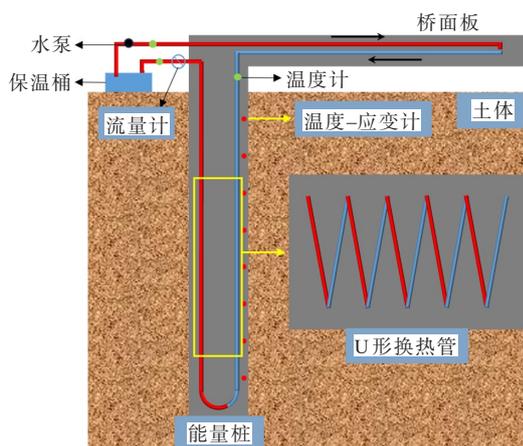


图4 能量桩融雪除冰系统^[60]

Figure 4 Energy pile snow and ice melting system^[60]

学者们针对能量桩换热效率及热-力响应特性问题开展了一系列研究,并取得了突破性的成果。陈鑫等^[60]为解决寒区桥面融雪除冰问题,开展了基于能量桩热泵系统的桥面板换热性能现场试验;党政等^[7]为了探索一种节能、环保、高效、经济的道路路面工程安全与耐久的新技术,利用试验场足尺水泥粉煤灰碎石能源桩,对模型混凝土路面冬季防冻除冰与夏季降温防护技术进行了试验研究;任连伟等^[61]、Faizal等^[62]、Tang等^[63-65]分析了水温作用下能量桩的换热效率与热-力响应特性;Park等^[66]、陈智等^[67]研究了恒定输入功率作用下能量桩的换热效率与热-力响应特性;桂树强等^[68]研究了能量桩在温度作用下的承载性能和变形问题。目前,针对桥面板埋管换热器系统的研究,主要集中于融雪除冰所需热量和桥面板的温度变化规律。

由于能量桩热泵系统具有高换热效率,可有效防止桥面板结冰,同时能量桩的混凝土结构与周围土壤紧密结合,提高了热传导效果,从而增强了浅层地热能的利用效率。此外,能量桩热泵系统减少了钻孔及其回填材料的成本,具有更高的经济效益。然而,能量桩身热泵系统也存在一些挑战和限制,例如,在极端气温条件下,系统的能效比可能会受到影响,需要消耗更多的热量进行加热或制冷,从而增加

了能源消耗。

3.3 电力融雪化冰技术

电力融雪化冰技术是一种将电能通过电阻发热原理转化为热能的融雪除冰方法^[9]。电力除冰作为一种新型的桥面路面融雪除冰技术,主要包括电缆加热路面^[69]、导电混凝土^[70]两种。

电缆加热路面技术是指通过埋于路面下的电缆实现电能热能的转换,以达到加热路面的方法。电缆加热路面示意图如图5所示。1961年美国学者首次提出将电缆加热系统埋置于路面2 cm深度处,发现该系统融雪化冰效果优异,但是经过长时间车辆荷载作用,部分电缆线被拔出,严重损害路面结构。后续学者提出在路面开槽的方法,该方法虽然避免了加热电缆被拔出现象,但是增加了施工工艺和成本,开槽和回补对路面都会造成损坏^[8]。关于电缆在路面的布置方法后续还有待进一步改善。张登春等^[71]通过室内试验对桥梁发热电缆进行了研究,得出桥面温度控制为2.5~3℃,可有效防止路面结冰;王峰等^[72]考虑了发热电缆的铺装功率对路面融雪除冰的影响,结果表明:铺装功率达到270 W/m²时,融雪除冰效果良好;Zhu等^[73]使用有限元法研究了各种参数对电缆加热路面系统融雪、能耗和力学性能的影响,并在研究基础上提出了一种新设计方法,经过模型试验验证了该方法的可行性;冀晨宇^[74]为提高碳纤维发热电缆沥青路面的力学性能,提出将发热电缆与玻纤格栅组合应用,结果表明:发热电缆-玻纤格栅沥青混凝土路面抗裂性能较发热电缆路面显著提高,并且经过试验发现发热电缆最佳间距为150 mm,埋深为5 cm;马子鹏^[75]以碳纤维布、石墨以及硫化剂为原材料,研发了一种新型电加热导电橡胶复合材料,并成功将该技术应用于实体工程中,实现了道路绿色、低能耗、实时、安全以及智能化的除冰雪目标。

电缆加热路面整体融雪除冰效率高,相对于传统融雪除冰技术更智能,但电缆加热路面目前存在以下两个问题:①路用融雪除冰加热电缆主要以碳纤维为主,大量使用碳纤维并不经济;②电缆线在应用过程中普遍存在损坏路面完整性、影响路面整体力学性能,后续在电缆加热路面的研究中还有待研发出替代碳纤维加热线的新材料以及完善施工工序,按照各个地区环境确定相应施工规范。

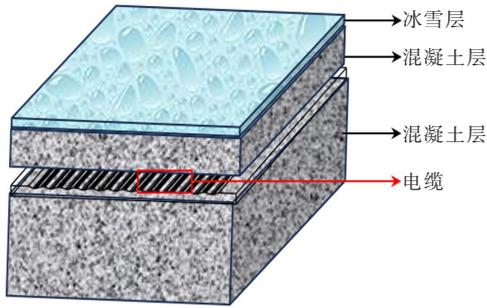


图 5 电缆加热路面示意图

Figure 5 Cable heating road surface

导电混凝土是指将导电材料与混凝土材料拌和后铺设于道路上,利用通电后电流产生的热量来融化路面积雪和冰层。导电混凝土示意图如图 6 所示。

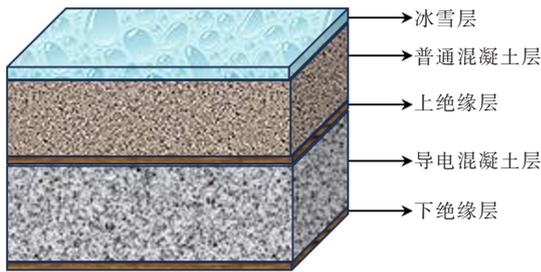


图 6 导电混凝土路面示意图

Figure 6 Conductive concrete road surface

石墨、石墨烯、炭黑、钢纤维以及碳纤维等常被用作导电混凝土中的导电材料^[5,76]。导电材料的各项性能指标如表 8 所示。导电混凝土分为单项导电混凝土和多项导电混凝土。其中,单项导电混凝土包括:碳纤维导电混凝土、石墨和炭黑导电混凝土、钢纤维导电混凝土;多项导电混凝土包括:钢纤维-

石墨烯导电混凝土、钢纤维-碳纳米管导电混凝土、碳纤维-纳米炭黑导电混凝土、钢纤维-石墨导电混凝土、碳纤维-钢纤维-石墨导电混凝土^[77]。唐丽云等^[78-79]为检测冻土未冻水含量构建了电阻率、温度及未冻水含量模型;Zhang 等^[80]通过在水泥混凝土路面材料中添加柔性石墨-PET 薄膜,并利用电能加热,实现了路面的自动除冰,且效果显著;韩栓业^[81]针对道路冰雪问题,提出了采用碳纤维布和橡胶基体形成结构一体化的导电橡胶复合型材并应用于道路,结果表明导电三元乙丙橡胶复合材料在道路中的应用可以显著提升路面的耐久性以及融雪可行性;Wu 等^[82]研发了一种新型三相复合导电混凝土,该材料由碳纤维、钢纤维和石墨构成。通过路面除冰试验验证,该混凝土热效应满足路面除冰要求且在融化冰雪方面表现出极高的效率。表 9 为导电混凝土工作原理及优缺点。

表 8 不同导电材料性能指标对比^[8]

Table 8 Comparison of performance indicators of different conductive materials

导电填料类型	形状	导电效果	长期稳定性	相容性	分散状况	经济性
碳纤维	纤维状	优	良	优	差	差
钢纤维	纤维桩	优	次	差	中	中
石墨	粉末状	良	良	优	优	中
炭黑	粉末状	中	良	优	优	中
石墨烯	层状	优	良	差	差	差
碳纳米管	长管状	优	优	优	差	差

表 9 导电混凝土工作原理及优缺点

Table 9 Working principle and advantages and disadvantages of conductive concrete

种类	工作原理	优点	缺点
碳纤维导电混凝土	利用碳纤维电阻发热效应融雪除冰	质量轻、导电性优异	成本高、分散性差、电阻测试值离散性大
石墨和炭黑导电混凝土	通过石墨和炭黑颗粒间的接触点发热融雪除冰	石墨可以形成稳定的导电网络,炭黑可调性好	石墨加工难度大、成本高;炭黑与水泥黏结性差
钢纤维导电混凝土	通过钢纤维通入电流时发热特性融雪除冰	具有优异力学性能、高导电性和热传导性	成本高、不能均匀分布、易钝化
钢纤维-石墨烯导电混凝土	通过钢纤维发热与石墨烯接触点发热两者结合融雪除冰	显著改善钢纤维与水泥基体间界面性能	成本高、施工复杂
碳纳米管-钢纤维导电混凝土	通过钢纤维与碳纳米管导电发热融雪除冰	掺入碳纳米管可以改善钢纤维与骨料间的界面导电性能	成本高、施工复杂

续表9

种类	工作原理	优点	缺点
纳米炭黑-碳纤维导电混凝土	通过碳纤维的电阻发热效应与炭黑接触点发热两者结合融雪除冰	导电网络均匀,导电性能优越	成本高、分散性差
钢纤维-石墨导电混凝土	通过钢纤维发热与石墨接触点发热两者结合融雪除冰	改善钢纤维团聚导致的导电传热不稳定现象	成本高、施工复杂
钢纤维-碳纤维-石墨导电混凝土	通过碳纤维的电阻发热效应、石墨接触点发热以及钢纤维导电发热特性融雪除冰	混凝土整体强度高、导电传热性能优异	成本高,施工工艺复杂,不好控制各成分掺量

由表9可知:通过在混凝土中添加不同导电材料使其具有优异的融雪除冰性能,并且部分学者通过试验研究发现将两种及以上不同导电材料掺入混凝土中制备的多项导电混凝土可以实现单项导电混凝土的劣势互补,在增强导电性能的同时提高了混凝土的强度。但是目前单项导电混凝土中导电材料存在分散性差,与混凝土基体之间黏结性差等缺点,多项导电混凝土存在成本高、施工复杂等缺点,难以实际应用,后续研究中需要进一步优化施工工艺,研发出更为经济适用的导电材料,降低导电混凝土的成本。

4 结论与展望

基于本文综述研究发现,目前道路桥梁融雪除冰技术主要侧重于主动融雪除冰技术以及能量利用型融雪除冰技术的研发,并取得了突破性的进展,但是实际应用于工程中时还存在诸多问题。对于传统的融雪除冰技术由于其融雪除冰的被动性受关注较少,但是在特殊工况下仍是首选的融雪除冰方法,后续还有待进一步研究。据此,得出以下结论:

(1) 传统的氯盐类融雪剂大量使用会对桥梁路面造成腐蚀,降低路面结构的使用寿命,并且会给周围植被带来严重的危害,当前更为环保的环境友好型融雪剂的研究是亟待解决的问题。

(2) 抑制冻结类铺装技术可以显著提高路面的融雪化冰效率,但是长期使用会损伤路面性能,破坏路面完整性降低耐久性,大面积应用具有一定局限性,后续还需提出合理的完善方法,建立系统的评价周期和论证体系。

(3) 相变材料融雪除冰路面的研究,降低了融雪除冰过程中能源的消耗,符合当前倡导的绿色节能的背景,探索出了新的途径。但是对于低温相变除

冰混凝土的研究仍停留在室内试验、理论研究上,为进一步推广应用后续还需结合实际工程研究。

(4) 对于电力融雪技术,在研究成果的基础上,研发出更高效的加热元件和控制系统,同时降低能源消耗,提高能源利用效率是未来亟须解决的问题,在实际应用方面,通过优化生产工艺和材料选择,降低电力融雪除冰系统的成本,是未来发展的趋势。

(5) 现有研究中多利用微生物进行加速结冰以固化土壤、修补裂缝,本文基于以上研究对利用微生物加速融雪除冰的新技术提出展望,在未来寒区道路桥梁工程中实现融雪除冰的同时顺应当前绿色环保的时代背景,具有可持续发展的优势。

参考文献:

References:

- [1] SEEHERMAN J, LIU Y. Effects of extraordinary snowfall on traffic safety[J]. Accident Analysis & Prevention, 2015, 81:194-203.
- [2] WALLMAN C G, HENRIK ÅSTRÖM. Friction measurement methods and the correlation between road friction and traffic safety: A literature review[J]. Vti Meddelanden, 2001 (3):367-377.
- [3] GRUBER M R, HOFKO B, HOFFMANN M, et al. Deicing performance of common deicing agents for winter maintenance with and without corrosion-inhibiting substances[J]. Cold Regions Science and Technology, 2023, 208:103795.
- [4] 周纯秀. 冰雪地区橡胶颗粒沥青混合料应用技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2006.
ZHOU Chunxiu. Study on application technology of rubber granular asphalt mixture in ice and snow area[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [5] 《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术研究成果综述·2020[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10):1-66.

- Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's pavement engineering research 2020[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020,33(10):1-66.
- [6] 王华军,赵军,陈志豪,等. 太阳能-地热道路融雪系统路面传热特性的数值研究[J]. 太阳能学报,2007,28(6):608-611.
WANG Huajun,ZHAO Jun,CHEN Zhihao,et al.Numerical study on heat-transfer behavior of the pavement in road snow-melting system with solar and geothermal energy[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica,2007,28(6):608-611.
- [7] 党政,关文,程晓辉,等. CFG 能源桩用于混凝土路面除冰降温的试验研究[J]. 中国公路学报,2019,32(2):19-30.
DANG Zheng, GUAN Wen, CHENG Xiaohui, et al. Experimental study on CFG energy pile for concrete pavement deicing and cooling[J]. China Journal of Highway and Transport,2019,32(2):19-30.
- [8] 谭忆秋,张驰,徐慧宁,等. 主动除冰雪路面融雪化冰特性及路用性能研究综述[J]. 中国公路学报,2019,32(4):1-17.
TAN Yiqiu,ZHANG Chi,XU Huining,et al.Snow melting and deicing characteristics and pavement performance of active deicing and snow melting pavement[J]. China Journal of Highway and Transport,2019,32(4):1-17.
- [9] 喻文兵,李双洋,冯文杰,等. 道路融雪除冰技术现状与发展趋势分析[J]. 冰川冻土,2011,33(4):933-940.
YU Wenbing, LI Shuangyang, FENG Wenjie, et al. Snow and ice melting techniques of pavement: State of the art and development tendency[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2011,33(4):933-940.
- [10] 胡雅灵. 道路除雪设备技术与创新研究[J]. 中国新技术新产品,2010(18):64.
HU Yaling. Research on technology and innovation of road snow removal equipment[J]. China New Technologies and Products,2010(18):64.
- [11] LIU X M,ZHAO Y,LIU W Z,et al.Microwave heating and deicing efficiency for asphalt concrete with SiC-Fe₃O₄ microwave enhanced functional layer[J]. Journal of Cleaner Production,2022,332:130111.
- [12] LIU Z M, YANG X, WANG Y D, et al. Engineering properties and microwave heating induced ice-melting performance of asphalt mixture with activated carbon powder filler[J]. Construction and Building Materials,2019, 197:50-62.
- [13] 王剑英,王选仓,丁龙亭,等. 除雪化冰路面微波敏感涂层材料与设备[J]. 长安大学学报(自然科学版),2018,38(5): 49-57.
WANG Jianying,WANG Xuancang,DING Longting,et al. Microwave sensitive coating materials and equipment for snow removal[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2018,38(5):49-57.
- [14] 刘长生. 我国南方道路除冰机振动滚筒的研究[J]. 中南林业科技大学学报,2010,30(9):85-90.
LIU Changsheng. Design of vibration drum of highway deicing machine used in South China[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2010, 30(9): 85-90.
- [15] 朱自成,张学军,王强,等. 路面复合除冰机的热力射流系统的设计与试验研究[J]. 中国农机化学报,2015,36(1): 54-58.
ZHU Zicheng,ZHANG Xuejun,WANG Qiang,et al.Design and experimental research of thermal water-jet system used in pavement composite deicing machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2015,36(1):54-58.
- [16] 马爱元,张利波,孙成余,等. 高氯氧化锌烟尘微波介电特性及温升特性[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(2):410-415.
MA Aiyuan,ZHANG Libo,SUN Chengyu,et al.Microwave dielectric properties and temperature increasing characteristics on zinc oxide dust with high content of Cl [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2015,46(2):410-415.
- [17] 李平,王梓晗,张洪刚,等. 融雪剂融冰能力评价方法研究[J]. 公路交通科技,2023,40(11):85-95.
LI Ping,WANG Zihan,ZHANG Honggang,et al.Study on evaluation method for ice-melting capacity of snow-melting agent[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2023,40(11):85-95.
- [18] 吕悦晶,党博,张志伟,等. 基于改进 SHRP 融冰试验的氯盐融雪剂性能研究[J]. 中外公路,2024,44(3):262-269.
LYU Yuejing, DANG Bo, ZHANG Zhiwei, et al. Performance of chlorine salt snow-melting agent based on improved SHRP ice-melting test[J]. Journal of China & Foreign Highway,2024,44(3):262-269.
- [19] VITALIANO D F. An economic assessment of the social costs of highway salting and the efficiency of substituting a new deicing material[J]. Journal of Policy Analysis and Management,1992,11(3):397-418.
- [20] 郭金禹,王树轩. 缓蚀型氯化钙融雪剂的开发[J]. 盐业与化工,2010,39(6):12-14.
GUO Jinyu, WANG Shuxuan. Development of anti-

- corrosive snow-melting agent of calcium chloride[J]. Journal of Salt and Chemical Industry,2010,39(6):12-14.
- [21] 许英梅,张秋民,张伟,等.一种低成本环保型融雪剂的制备与性能研究[J].辽宁化工,2007,36(1):10-11,15.
XU Yingmei,ZHANG Qiumin,ZHANG Wei,et al.Study on the preparation and performance of low-cost environmental CMA deicers[J]. Liaoning Chemical Industry,2007,36(1):10-11,15.
- [22] 林永波,李超,魏高亮,等.显色环保型融雪剂的研制[J].环境科学与管理,2010,35(3):146-149.
LIN Yongbo,LI Chao,WEI Gaoliang,et al.Studies on snow-melting agent with colouration and environmental protection[J]. Environmental Science and Management, 2010,35(3):146-149.
- [23] 郑武西,区桦,宗炜,等.道路融雪剂“精细化”使用技术研究与应用[J].公路,2022,67(1):344-348.
ZHENG Wuxi,OU Hua,ZONG Wei,et al. Research and application of “fine” application technology of road snow melting agent[J].Highway,2022,67(1):344-348.
- [24] 中国气象局.小雪、中雪、大雪、暴雪是如何划分的?[EB/OL].(2009-11-12)[2024-02-12].https://www.cma.gov.cn/2011xzt/2011zhuant/20111116_1/2010052703/201111/t20111128_155045.html.
China Meteorological Administration.How are light snow, moderate snow, heavy snow, and blizzard distinguished ? [EB/OL].(2009-11-12)[2024-02-12].https://www.cma.gov.cn/2011xzt/2011zhuant/20111116_1/2010052703/201111/t20111128_155045.html.
- [25] ZHANG Y M, ZHAO X J, ZHENG M L. Analysis of engineering performance and environmental impact of asphalt pavement debonding and ice suppression materials [J].Buildings,2023,13(3):689.
- [26] 张争奇,罗要飞,赵富强.储盐类融雪抑冰材料对沥青混合料性能影响研究进展[J].化工进展,2018,37(6):2282-2294.
ZHANG Zhengqi,LUO Yaofei,ZHAO Fuqiang.Review of research on the effect of salt storage deicing material on the preformance of asphalt mixture[J].Chemical Industry and Engineering Progress,2018,37(6):2282-2294.
- [27] CHEN Y Z, TAN Y Q, SHE H W, et al. Characteristics of slow-release ice and snow melting micro-surfacing materials[J]. International Journal of Pavement Engineering,2023,24(2):2120986.
- [28] 俞文生,张晓春,钟科.高弹蓄盐融冰雪沥青混合料除冰特性[J].中国矿业大学学报,2015,44(5):912-916.
YU Wensheng,ZHANG Xiaochun,ZHONG Ke.De-icing performance of asphalt mixture with snowmelt agent and high-elastic modified asphalt binder[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2015,44(5):912-916.
- [29] 张浩军,王修山,吴大志,等.掺V-260主动抑冰沥青混合料路用性能试验研究[J].公路,2015,60(8):26-29.
ZHANG Haojun,WANG Xiushan,WU Dazhi, et al. Test and study of road performance of V-260 automatic anti-freezing asphalt mixture[J].Highway,2015,60(8):26-29.
- [30] WU S Y, YANG J, SUN X Y, et al. Preparation and characterization of anti-freezing asphalt pavement[J]. Construction and Building Materials,2020,236:117579.
- [31] 谭忆秋,侯明昊,单丽岩,等.蓄盐沥青路面缓释络合盐填料的研制[J].建筑材料学报,2014,17(2):256-260.
TAN Yiqiu, HOU Minghao, SHAN Liyan, et al. Development of sustained release complex salt filler for asphalt pavement included salt[J]. Journal of Building Materials,2014,17(2):256-260.
- [32] 周水文,林芳,张晓华,等.低冰点沥青混合料融雪抑冰性能影响因素研究[J].中外公路,2023,43(1):207-214.
ZHOU Shuiwen, LIN Fang, ZHANG Xiaohua, et al. Influence factors of deicing and thaw performance of asphalt mixture with low freezing point[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023,43(1):207-214.
- [33] 彭磊.自融雪沥青路面外加剂制备与运用研究[D].西安:长安大学,2013.
PENG Lei. Study on preparation and application of self-melting snow asphalt pavement admixture[D]. Xi' an: Changan University,2013.
- [34] 李悦,李铁山,徐玉峰,等.多功能自融雪沥青路面的研究与应用[J].中外公路,2012,32(6):85-89.
LI Yue, LI Tieshan, XU Yufeng, et al. Research and application of multifunctional self-snowmelt asphalt pavement[J].Journal of China & Foreign Highway,2012,32(6):85-89.
- [35] MENG M Q, DENG S, CUI H, et al. Impact of initial gradation on compaction characteristics and particle crushing behavior of gravel under dynamic loading[J]. Powder Technology,2024,447:120216.
- [36] ZHONG K, SUN M Z, CHANG R H. Performance evaluation of high-elastic/salt-storage asphalt mixture modified with Mafilon and rubber particles[J]. Construction and Building Materials,2018,193:153-161.
- [37] 肖劲松,邹孟秋.物理-化学综合融雪除冰沥青混合料研究[J].公路,2017,62(8):248-252.

- XIAO Jinsong,ZOU Mengqiu.Study of asphalt mixture for melting snow and ice by physical-chemical combining means[J].Highway,2017,62(8):248-252.
- [38] ZOU G L,CHEN Q,JIAO Y Q,et al.Research on deicing performance of high-elastic/salt-storage asphalt mixture containing rubber particle and self-developed salt-storage filler[J]. Construction and Building Materials, 2024, 449: 138303.
- [39] 陈建民,刘东海,王锦余,等.掺废轮胎橡胶颗粒碎石封层黏结性研究[J].中外公路,2024,44(4):127-137.
- CHEN Jianmin,LIU Donghai,WANG Jinyu,et al.Bonding performance of chip seal containing waste tire rubber particles[J].Journal of China & Foreign Highway,2024,44(4):127-137.
- [40] HUANG J D,WANG Q.Retraction Note to:Influence of crumb rubber particle sizes on rutting, low temperature cracking, fracture, and bond strength properties of asphalt binder[J].Materials and Structures,2022,55(2):69.
- [41] 张晓亮.橡胶颗粒沥青路面抑冰雪技术研究[D].西安:长安大学,2014.
- ZHANG Xiaoliang.Study on ice and snow suppression technology of rubber particle asphalt pavement[D].Xi'an:Chang'an University,2014.
- [42] 张洪伟.橡胶颗粒除冰雪沥青路面的研究[D].西安:长安大学,2009.
- ZHANG Hongwei.Study on asphalt pavement with rubber particles to remove ice and snow[D].Xi'an:Chang'an University,2009.
- [43] 张聪.橡胶颗粒沥青路面耐久性研究[D].西安:长安大学,2012.
- ZHANG Cong.Study on durability of rubber particle asphalt pavement[D].Xi'an:Chang'an University,2012.
- [44] ALI MEMON S,CUI H Z,ZHANG H,et al.Utilization of macro encapsulated phase change materials for the development of thermal energy storage and structural lightweight aggregate concrete[J]. Applied Energy, 2015, 139:43-55.
- [45] SAKULICH A R, BENTZ D P. Incorporation of phase change materials in cementitious systems *via* fine lightweight aggregate[J]. Construction and Building Materials,2012,35:483-490.
- [46] SOUAYFANE F, FARDOUN F, BIWOLE P H. Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review[J]. Energy and Buildings, 2016, 129: 396-431.
- [47] ATHUKORALLAGE B, DISSANAYAKA T, SENADHEERA S, et al. Performance analysis of incorporating phase change materials in asphalt concrete pavements[J]. Construction and Building Materials, 2018, 164:419-432.
- [48] KAKAR M R, REFAA Z, WORLITSCHKEK J, et al. Use of microencapsulated phase change materials in bitumen to mitigate the thermal distresses in asphalt pavements[M]. RILEM Bookseries. Cham: Springer International Publishing, 2018:129-135.
- [49] 李莉.相变材料及其储能混凝土的制备与性能研究[D].重庆:重庆大学,2010.
- LI Li.Study on preparation and properties of phase change materials and their energy storage concrete[D].Chongqing:Chongqing University,2010.
- [50] HUNGER M, ENTROP A G, MANDILARAS I, et al. The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated phase change materials[J]. Cement and Concrete Composites,2009,31(10):731-743.
- [51] 臧初越.水泥基封装胶囊相变材料的力学和抗冻性能研究[D].徐州:中国矿业大学,2021.
- ZANG Chuyue.Study on mechanics and frost resistance of cement-based encapsulated phase change materials[D].Xuzhou:China University of Mining and Technology,2021.
- [52] ZHAO L, YU Q F, LI M, et al. Preparation and thermal properties of low-temperature composite phase-change materials based on a binary eutectic mixture with expanded graphite:Effect of particle size and mass fraction [J].Journal of Energy Storage,2021,40:102778.
- [53] 苟珊.水泥路面抗凝冰低温相变材料开发与性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2019.
- GOU Shan.Development and performance study of anti-icing low temperature phase change materials for cement pavement[D].Chongqing:Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [54] 贾蒲悦,武卫东,王益聪.新型0℃相变蓄冷材料制备及蓄冷特性[J].化工进展,2019,38(6):2862-2869.
- JIA Puyue, WU Weidong, WANG Yicong. Preparation of 0℃ phase change material and its cold storage performance in cold-chain logistics[J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2019,38(6):2862-2869.
- [55] 周孙希,章学来,刘升.十四烷-正辛酸有机复合相变材料的制备和性能[J].储能科学与技术,2018,7(4):692-697.
- ZHOU Sunxi,ZHANG Xuelai,LIU Sheng.Preparation and thermal property of a tetradecane-octanoic acid eutectic

- phase change material[J]. *Energy Storage Science and Technology*,2018,7(4):692-697.
- [56] HAN C J, YU X. An innovative energy pile technology to expand the viability of geothermal bridge deck snow melting for different United States regions: Computational assisted feasibility analyses[J]. *Renewable Energy*, 2018, 123:417-427.
- [57] LIU H W, MAGHOUL P, BAHARI A, et al. Feasibility study of snow melting system for bridge decks using geothermal energy piles integrated with heat pump in Canada[J]. *Renewable Energy*,2019,136:1266-1280.
- [58] PAN P, WU S P, XIAO Y, et al. A review on hydronic asphalt pavement for energy harvesting and snow melting [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,2015,48: 624-634.
- [59] 吴定意,申路,陶佳瑜,等. 新能源在寒区道路桥梁融雪问题的应用技术研究[J]. *四川建筑*,2020,40(1):109-110,112. WU Dingyi, SHEN Lu, TAO Jiayu, et al. Study on application technology of new energy in snow melting of roads and bridges in cold regions[J]. *Sichuan Architecture*, 2020,40(1):109-110,112.
- [60] 陈鑫,孔纲强,刘汉龙,等. 桥面融雪除冰能量桩热泵系统换热效率现场试验[J]. *中国公路学报*,2022,35(11):107-115. CHEN Xin, KONG Gangqiang, LIU Hanlong, et al. Field tests on heat transfer efficiency of bridge deck snow melting and deicing using energy pile heat pump system [J]. *China Journal of Highway and Transport*,2022,35(11): 107-115.
- [61] 任连伟,徐健,孔纲强,等. 冬季工况多次温度循环下微型钢管桩群桩热力响应特性现场试验[J]. *岩土工程学报*, 2019,41(11):2053-2060. REN Lianwei, XU Jian, KONG Gangqiang, et al. Field tests on thermal response characteristics of micro steel pile group under multiple temperature cycles in winter conditions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*,2019,41(11):2053-2060.
- [62] FAIZAL M, BOUAZZA A, HABERFIELD C, et al. Axial and radial thermal responses of a field-scale energy pile under monotonic and cyclic temperature changes[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*,2018,144(10):04018072.
- [63] TANG L Y, CUI Y P, CHEN J B, et al. Analysis and research on the difference of design codes for vertical bearing capacity of pile foundation in cold regions[J]. *Cold Regions Science and Technology*,2023,206:103723.
- [64] TANG L Y, YANG L J, QIU P Y, et al. Degradation characteristics and bearing capacity model of pile in degraded permafrost[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2022, 175(4): 414-425.
- [65] TANG L Y, WANG K, DENG L J, et al. Axial loading behaviour of laboratory concrete piles subjected to permafrost degradation[J]. *Cold Regions Science and Technology*,2019,166:102820.
- [66] PARK S, LEE D, LEE S, et al. Experimental and numerical analysis on thermal performance of large-diameter cast-in-place energy pile constructed in soft ground[J]. *Energy*, 2017,118:297-311.
- [67] 陈智,高华雨,肖衡林,等. 温度荷载作用下灌注型能量桩热力响应原位试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*,2019,39(4):592-598. CHEN Zhi, GAO Huayu, XIAO Henglin, et al. In-situ thermo-mechanical response test of perfusion energy pile under temperature loading[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(4): 592-598.
- [68] 桂树强,程晓辉. 能源桩换热过程中结构响应原位试验研究[J]. *岩土工程学报*,2014,36(6):1087-1094. GUI Shuqiang, CHENG Xiaohui. In-situ tests on structural responses of energy piles during heat exchanging process [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(6):1087-1094.
- [69] 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/OL]. *中国公路学报*, 1-16[2024-06-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20240314.1544.002.html>. GUO Meng, CAI Xiaoxiao, WANG Jingjing, et al. Analysis of environmental load during the life cycle of road snow melting and deicing technology[J/OL]. *China Journal of Highway and Transport*, 1-16[2024-06-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20240314.1544.002.html>.
- [70] ZHAO H M, WU Z M, WANG S G, et al. Concrete pavement deicing with carbon fiber heating wires[J]. *Cold Regions Science and Technology*,2011,65(3):413-420.
- [71] 张登春,章照宏,袁江雅,等. 公路桥梁发热电缆除冰系统试验研究[J]. *中国安全生产科学技术*,2015,11(11):90-95. ZHANG Dengchun, ZHANG Zhaohong, YUAN Jiangya, et al. Experimental research on deicing system by heating cables for highway bridges[J]. *Journal of Safety Science and Technology*,2015,11(11):90-95.

- [72] 王锋,韩森,张丽娟,等.融冰雪沥青混合料盐分溶析试验[J].长安大学学报(自然科学版),2010,30(6):16-19,55.
WANG Feng, HAN Sen, ZHANG Lijuan, et al. Efflorescence experiment of asphalt mixture with salt for melting snow and ice[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2010, 30(6): 16-19, 55.
- [73] ZHU X Y, ZHANG Q F, DU Z, et al. Snow-melting pavement design strategy with electric cable heating system balancing snow melting, energy conservation, and mechanical performance[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 177: 105970.
- [74] 冀晨宇.碳纤维发热电缆-玻纤格栅沥青混凝土力学性能研究[D].邯郸:河北工程大学,2022.
JI Chenyu. Study on mechanical properties of carbon fiber heating cable-glass fiber grating asphalt concrete[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2022.
- [75] 马子鹏.基于导电橡胶复合材料的电加热融冰雪铺装结构设计及应用研究[D].长春:吉林大学,2024.
MA Zipeng. Design and application research of electrically heated ice and snow melting paving structure based on conductive rubber composite material[D]. Changchun: Jilin University, 2024.
- [76] 张宗伟,何凯.石墨烯类材料改性沥青的研究进展[J/OL].中外公路, 1-12[2024-09-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.u.20240419.1900.002.html>.
ZHANG Zongwei, HE Kai. Research progress of graphene modified asphalt[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 1-12[2024-09-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.u.20240419.1900.002.html>.
- [77] 张九思,朱珊,李婧铭,等.不同种类导电相材料在混凝土损伤检测领域的应用前景分析[J].建筑结构,2023,53(增刊2):1744-1747.
ZHANG Jiushi, ZHU Shan, LI Jingming, et al. Analysis of the application prospects of different types of conductive materials in the field of damage detection of conductive concrete[J]. Building Structure, 2023, 53(sup 2): 1744-1747.
- [78] 唐丽云,王柯,杨更社,等.基于土体电阻率变化的冻土未冻水含量检测系统及方法:中国,CN106771082A[P].2017-05-31.
TANG Liyun, WANG Ke, YANG Gengshe, et al. Detection system and method of unfrozen water content in frozen soil based on changes in soil resistivity: China, CN106771082A[P]. 2017-05-31.
- [79] 唐丽云,王柯,杨更社,等.冻土电阻率和温度与冻土未冻水含量的关系模型构建方法:中国,CN106546711A[P].2017-03-29.
TANG Liyun, WANG Ke, YANG Gengshe, et al. Method for constructing a model of the relationship between frozen soil resistivity, temperature, and unfrozen water content: China, CN106546711A[P]. 2017-03-29.
- [80] ZHANG Q Q, YU Y K, CHEN W Z, et al. Outdoor experiment of flexible sandwiched graphite-PET sheets based self-snow-thawing pavement[J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 122: 10-17.
- [81] 韩栓业.道路融冰雪导电橡胶复合材料特性与发热效应研究[D].长春:吉林大学,2023.
HAN Shuanye. Study on characteristics and heating effect of conductive rubber composites for road melting snow and ice[D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [82] WU J M, LIU J G, YANG F. Three-phase composite conductive concrete for pavement deicing[J]. Construction and Building Materials, 2015, 75: 129-135.

(上接第 24 页)

- NING Xinyang, ZENG Jun, LYU Guoliang. Flexible comprehensive protection scheme for weak expansive soil slopes in watershed section of Caizi Lake and Chao Lake of water transfer project from Yangtze River to Huaihe River[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2022, 43(5): 67-72.
- [25] 徐永福,程岩,唐宏华.膨胀土边坡失稳特征及其防治技术标准化[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(1):1-20.
XU Yongfu, CHENG Yan, TANG Honghua. Failure characteristics of expansive soil slope and standardization of slope slide prevention by geotextile bag[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 1-20.
- [26] 叶为民,孔令伟,胡瑞林,等.膨胀土滑坡与工程边坡新型防治技术与工程示范研究[J].岩土工程学报,2022,44(7): 1295-1309.
YE Weimin, KONG Lingwei, HU Ruilin, et al. New prevention and treatment techniques and their applications to landslides and engineering slopes of expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(7): 1295-1309.