

刘状壮,张有为,季鹏宇,等. 电热型融雪路面技术研究综述[J]. 长安大学学报(自然科学版),2022,42(3):14-25.

LIU Zhuang-zhuang, ZHANG You-wei, JI Peng-yu, et al. Review on technology of electric heating snow-melting pavement[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2022, 42(3): 14-25.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2022.03.002

电热型融雪路面技术研究综述

刘状壮^{1,2}, 张有为¹, 季鹏宇¹, 郝亚真¹, 李 林¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要:电热型融雪路面作为一种主动型路面冰雪控制技术,能够在冬季寒冷环境下高效、智能地实现路表抗滑安全供给,是多学科深度交叉融合的全新领域,也是近年来智能路面方向的研究热点之一。为了总结其现有研究的不足、进一步推进道路除冰雪技术发展,系统总结了国内外电热型融雪路面技术研究现状,对电热型融雪路面技术工作原理、系统组成以及相关技术问题进行了对比分析。首先,阐述电热型融雪路面的工作原理和道路结构传热机制,总结路面传热模型建立方法和基本传热方程,讨论电热型融雪路面传热模型中的冰-雪-水相变、多场耦合以及实际工况问题。然后,基于电热型融雪路面传热原理及传热过程,将电热型融雪路面分成发热系统和导热系统两部分,梳理和总结了路面发热系统设计参数以及各设计参数(发热材料、埋设深度、布设间距以及输入功率等)对路面发热和融雪效果的影响。最后,对路面导热系统道路材料组成设计、导热性能评价和层位结构组合影响进行了分析,并对电热型融雪路面技术融雪效果评价方法局限性进行了分析。结果表明:电热型融雪路面技术当前研究的重点多集中于导热材料、系统参数研究及环境因素影响,未来应从融雪效果评价、耗能评价及路用性能等方面开展研究。

关键词:道路工程;路面冰雪防控;融雪路面;融雪传热模型;发热系统;路面导热

中图分类号:U414

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2022)03-0014-12

Review on technology of electric heating snow-melting pavement

LIU Zhuang-zhuang^{1,2}, ZHANG You-wei¹, JI Peng-yu¹, HAO Ya-zhen¹, LI Lin¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Highway Engineering in Special Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: As a kind of active pavement snow and ice control technology, electric heating snow-melting pavement can efficiently and intelligently realize the anti-slip safety supply of road surface under the cold environment in winter, which was a new field of multidisciplinary deep cross-fertilization and one of the research hotspots in the direction of intelligent pavement in recent years. In order to summarize the shortcomings of existing research on this technology and promote the development of pavement snow-melting technologies, the current situation of domestic and foreign research on electric snow-melting pavement technology was systematically summarized, and a comparative analysis on the working principle, system composition and related

收稿日期:2021-11-31

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB1600201);西安市科技计划项目(2019114213CXSF020SF030)

作者简介:刘状壮(1986-),男,江苏宿迁人,教授,博士研究生导师,E-mail:zzliu@chd.edu.cn.

technical issues of electric heating snow-melting pavement technology was conducted. Firstly, the working principle of electric heating snow-melting pavement and the heat transfer mechanism of road structure were explained, the method of establishing the heat transfer model and the basic heat transfer equation of pavement were summarized, and the ice-snow-water phase change, multi-field coupling and practical working condition problems in the heat transfer model of electric heating snow-melting pavement were discussed. Then, based on the heat transfer principle and heat transfer process of electric heating snow-melting pavement, the electric heating snow-melting pavement was divided into two parts, heat generating system and heat conducting system, and the influence of the design parameters of the heat generating system and the design parameters of the heat generating system (heating material, burial depth, layout spacing and input power, etc.) on the heat generating and snow melting effect of the pavement was sorted out and summarized. Subsequently, the influence of road material composition design, thermal conductivity evaluation and layer structure combination of the pavement heat conduction system was analyzed. Finally, the design of road material composition of pavement thermal conductivity system, the evaluation of thermal conductivity and the influence of layer structure combination were analyzed, and the limitations of the snow-melting effect evaluation method of electric heating snow-melting pavement technology were discussed. The results show that the current research of electric heating snow-melting pavement technology focuses on heat-conducting materials, system parameters and the influence of environmental factors. In the future, the technology should be researched from the aspects of snow-melting effect evaluation, energy consumption evaluation and road performance. 3 tabs, 5 figs, 68 refs.

Key words: road engineering; road snow and ice prevention and control; snow-melting pavement; snow melting heat transfer model; heating system; heat conduction on road

0 引言

据统计,中国有超过 70% 的道路受冰雪天气影响。交通部事故统计数据显示,年末年初月份交通事故较多^[1],主要原因是附着在道路表面的冰雪会导致路面摩擦因数下降^[2],车轮与路面之间的附着系数显著降低,路面的抗滑性能下降致使行车制动困难^[3],对道路通行效率及行车安全造成威胁^[4]。

传统的路面除冰雪以人工、机械法和化学融雪剂相结合的方式为主^[5],在积雪的道路上撒布化学融雪剂或通过大型除冰雪机器将路面的积雪清除。这类方法通常在降雪后或路面已经产生积雪时进行除雪施工,被称为“被动式”除雪法^[6],在除冰雪过程中,需要耗费大量的人力、使用大型复杂的机械设备,并且融雪时需要大量的化学融雪剂,需要对融雪剂撒布路径进行科学合理规划^[7]。即便如此,“被动式”除雪法的融雪效果也并不理想:此类方法需要封闭部分甚至全部交通,效率低下,且当环境温度较低或积雪层厚度较大时,难以彻底清除所有附着的冰雪;此外,这类方法还会对道路及其附属设施^[8]甚至

周围生态环境产生较为严重的破坏^[9]。

近年来,许多科研工作者针对如何安全、高效并且环保地除去路面上的冰雪这一问题展开研究,已经取得了诸多进展。刘西雷等在道路面层材料中添加一定的弹性材料,利用弹性材料的高变形特性使路面冰雪层在车辆荷载作用下受力不均匀而破碎,从而实现路面冰雪破碎^[10-11]。Liu 等将改性盐化物填料拌入沥青混合料中,制备得到具有融冰化雪、抑制冻结功能的融雪抑冰沥青混合料(又称蓄盐沥青混合料),获得了较好的道路抑冰效果^[12-13]。Arabzadeh 等在道路表面施加超疏水涂层,利用特定材料的疏水特性,增大水和路面之间的接触角,延缓液态水凝结^[14-15]。此外,还可将一定数量的发热体埋置在道路结构内部,利用发热体的热效应提升道路结构温度,再将结构内部热量传导至道路表面,达到融雪化冰的目的^[16]。这类将外界能量转化为融雪所需热能的路面被称为能量转化型路面,主要包括流体加热路面^[17]、电热型路面^[18]和热管加热路面^[19]等。

电热型融雪路面技术作为能量转化型路面中的一种^[20],将发热体预埋在路面下方一定深度处,以

特定的方式进行排列,将外部电能转化为热能后,热量自下而上传递至路表以达到融雪化冰的目的。该技术在安全、高效环保融雪的同时,不会破坏道路环境以及道路结构的完整性,且通过控制输入电能还可以达到智能、实时融雪的效果,提高能量利用率。将发热线用于道路融雪,最早是由美国学者 Henderson^[21]在 1965 年提出,但限于当时的技术条件,并未达到理想的融雪效果。经过几十年的发展,国内外已有多条试验路段通过预埋发热线融化路面冰雪,并取得了良好融雪效果^[22-23]。

对于能量转化型路面,具有良好导热能力的道路结构是保证融雪效率、提高能量利用率的关键。通常在普通混凝土的制备过程中掺加一定量的复合相填料替代集料或矿粉,如钢渣、石墨烯、碳纤维、钢丝绒等^[24-25],用于增加混凝土的导热导电性^[26],提高能量传递效率,这类功能性混凝土被统称为导电导热混凝土。作为传导性混凝土,导热混凝土和导电混凝土的作用出发点和侧重点有所区别,导热混凝土主要从提高混合料的集热效率出发,通过导热相填料的添加,提高混合料的导热系数,加强集料的内部热量传热性能;而导电混凝土通过在集料中加入复合型导电材料,在材料结构内部形成通畅的导电网络,提高其电导率,通过外接电源利用电热效应使混凝土发热升温,进而使得路表冰雪受热融化。在能量转化型路面中,路表融雪化冰的热量依赖于道路结构内部的发热体,而上层混凝土的导热性能直接影响了热量的传导效率,因此导热性能良好的混凝土尤为重要,有必要在满足路用性能的前提下,尽可能提高其热传导性能,为实现这一目标需要对导热混凝土的材料组成、配合比设计展开研究。

电热型融雪路面系统根据能量产生传导路径,大致可分为 2 个部分,即提供热量的发热系统和传导热量的导热系统,两部分的各项参数均会对融雪效果产生不同程度的影响。本文在介绍路面传热模型研究现状的基础上,对路面发热系统和道路导热系统进行详细综述,以期提供相对完整的视角来了解电热型自融雪路面研究现状,促进该技术在道路工程中的创新与工程应用。

1 路面传热模型

道路融雪问题的实质是一个涉及相变、复杂热量以及质量等其他物理量传导的瞬态传热过程^[27]。融雪时,道路内部的发热体将外部输入的能量转化为热量,其中大部分经具有导热能力的上层混凝土

传导至面层,面层冰雪吸热升温,最终,固态的冰雪融化成液态的水。在整个过程中,伴随着冰/雪-水相变、多场耦合作用以及实时融雪问题,在数学上是一个强非线性问题,只能在约束较多的特殊情况下得到分析解,一般情况下只能得到数值近似解或模拟计算解。这一过程的模拟计算,需要先利用传热学相关知识,建立基本传热方程,根据实际情况给出控制方程和边界条件^[28],再利用相应问题解决方法添加控制方程进行叠加求解。下文将对道路融雪模型中的常见问题及解决方法进行介绍。

1.1 传热模型原理

热传递是指热量从高温物体迁移到低温物体,或从一个物体中的高温部分迁移到低温部分的现象,根据传导方式的不同可以分为热传导、热辐射和热对流 3 种形式^[29]。而对于电热式融雪路面技术而言,其融冰化雪时能量传导过程如图 1 所示:当系统通电后,发热体开始发热,热量自导热混凝土传导至路面,路面温度逐渐升高,能量通过热传导传递至路面冰雪层,从而达到融雪化冰的效果。在此过程中,以固体与固体之间的热传导为主,路面表面与空气之间的热对流次之,热辐射最少。通过对融雪传热过程的分析,可以建立传热模型用于观察或预测表面冰雪层的融化情况,更好地指导融雪路面的建设与运行。

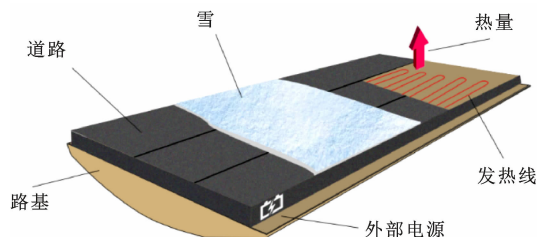


图 1 电热型融雪路面原理示意

Fig. 1 Schematic of heating snow-melting pavement

1.2 基本传热方程

传热模型的实质是在一定初始条件、边界条件和抽象模型的条件下,对传热方程进行求解的过程,在模型求解的过程中,由于传热条件、外界环境条件以及材料性质的不同,会造成模型复杂,难以求解的情况,此时需要对模型进行适当简化。

对于一个控制容积和封闭系统的传热系统,其中的介质可以简化为一个个相互靠近的微元,如图 2 所示。对于封闭系统或控制容积的物体,热力学第一定律^[30]可以作如下表述:在一个时间段(Δt)内,储存在控制容积内的能量增大值,必定等于进入控制容积的能量减去离开控制容积的能量,即

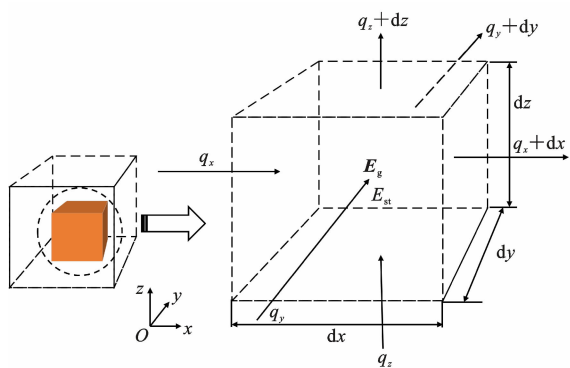


图2 导热分析微元

Fig. 2 Micro element analysis of heat conduction

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st} \quad (1)$$

式中: \dot{E}_g 为微元内部热源项; \dot{E}_{st} 为微元体积储能项; \dot{E}_{in} 为外界输入能量项; \dot{E}_{out} 为输出项。

其中: \dot{E}_g 与自身发热特性有关; \dot{E}_{st} 与物质密度、热容以及体积有关,如果在热量传递过程中,物质发生相变,则需要考虑潜热的影响^[31]; \dot{E}_{in} 和 \dot{E}_{out} 由导热速率项构成,现有传热模型大多利用傅里叶定律(式2)和牛顿冷却定律(式3)研究物质间的热传导和对流换热,即

$$q = -k \nabla T \quad (2)$$

$$q = h'(T - \vartheta) \quad (3)$$

式中: q 为热流密度(q_x 、 q_y 、 q_z 分别为 x 、 y 、 z 方向热流密度); k 为热导率; ∇T 为温度梯度; T 为系统温度; ϑ 为环境温度; h' 为对流换热系数。

基于上述基本方程,在不同场景下进行不同条件的拓展,可以建立特定传热模型用以解决具体问题。徐慧宁等综合考虑了融化雪水在道路结构中分布对融雪传热模型的影响,建立了二维温湿耦合传热模型,提升了模型预测精度^[17]。Rine等基于格林函数建立的变热流平板瞬态导热模型,确定了平板热源加热阶段和表面对流扩散阶段过程的解析解,可以用于判断平板传热中导热系数和边界条件问题^[32]。Liu所建立的二维传热模型采用一个相对粗糙的矩形网格系统来表示路面计算区域,利用相对简化的方程表示仅融雪的情况,并采用逐次替换法将路面板中的导热与上层的融雪模型耦合,从而实现对给定环境参数和输入功率条件下的融雪过程的预测^[33]。

1.3 模型中常见问题及解决方法

1.3.1 融雪过程中的相变问题

融雪是一个复杂的过程,过程中存在固、液并存的状态,此时传热介质的物理参数(密度、导热系数、比热容等)介于固态的雪和液态水之间。在此状态

下,物质内部的固相开始不断向液相转变,温度变化速率减缓。因此,要准确预估融雪过程中的问题,必须考虑融雪过程中的相变问题。目前常用的方法有以下几种:

(1) 焓变分析方法^[34]

当相变过程在某一特定温度下发生时,可利用焓变分析方法进行求解。初步假设两相均匀且密度相同,两相的其他物性质(导热系数、比热容等)可以不等,也可以随温度变化,在推导某个区域 Ω 的能量统一方程时,先不考虑相变对区域温度的影响,相应能量方程如下

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho h d\Omega = \int_{\Gamma} \lambda \nabla T n d\Gamma \quad (4)$$

式中: h 为焓; ρ 为物质的密度; λ 为导热系数; Ω 为控制容积; n 为表面外法线向量; Γ 为表面积。

式(4)中焓和温度均为待求值,当区域内发生相变时,由于焓中包含了相变潜热,故只要给定焓与温度的关系式,式(4)即可以转换为包含相变的能量方程。

(2) 显热容法^[35]

当区域内的相变过程不是在某一特定温度下发生,而是在一个小的温度范围内发生时,焓变分析方法不再适用。在这种情况下,可以将潜热认为是相变物质在该区域内的显热容量,此时物质相变界面两侧的控制方程和边界条件就可以利用显热容相结合,将多区域上的强非线性方程组转化为单一物质区域上的非线性方程组。

1.3.2 多场耦合问题

融雪过程主要是温度随时间变化的过程,所建立的模型也是基于热传学而建立的温度场模型,但在实际情况中,融雪过程并不是孤立的、单一的温度场问题,外界的许多场(如重力场、湿度场等)都会对模型中的温度变化速率产生影响,只是影响程度存在差异。

在融雪过程中,水对温度场的影响较大,这是因为道路结构中热量的变化会引起水分的迁移,上层融化的雪水会通过路面的孔隙渗入下层结构中,这些水会改变材料的物理特性^[36]。因此在建立温度场模型的时候,有必要加入传热过程中湿度的变化以建立温度-湿度耦合模型。如徐慧宁等建立的流体加热道路融雪系统温-湿耦合融雪模型,利用不同湿度下材料的导热系数将温度场和湿度场进行叠加耦合,提高了模型预测的精度^[17]。这也从侧面证明了在建模时,应根据影响程度考虑温度场与其他场的耦合问题或将其直接简化成单一物理场下的模型。

1.3.3 实时融雪和积雪层厚度问题

雪的密度和热容与积雪的厚度密切相关,当积

雪层厚度较大时,雪层孔隙小,密度较大;当积雪层厚度较小时,雪很松散,整个雪层的孔隙较大,孔隙中充满了空气,此时,雪层的密度较小。关于融雪层厚度可以分为 3 种情况:

- (1)开始加热时,雪层较厚,雪的密度较大,经过加热逐渐变薄。
- (2)开始加热时,雪层较薄,雪的密度小。
- (3)开始加热时,路面几乎无积雪,融雪过程是一个实时融雪过程。

对于这 3 种不同的情况,前 2 种情况在融雪初期传热存在差异,即由密度不同导致的传热速度不同;在融雪中后期相同,都存在相变问题。而第 3 种情况由于路面温度较高,雪落到路面上即时融化,在路面上同一空间内,不存在固-液两相共存的相变问题,此时,在融雪模型中,可以不考虑相变对传热过程的影响。尉学勇基于上述融雪过程,针对降雪前融雪、降雪后滞后融雪以及预热后实时融雪 3 种工况,分别建立数学模型,对融雪效果以及不同工况下的融雪所需能量进行了计算分析,计算结果与实际情况符合良好^[37]。管数园利用有限元软件建立了实时融雪模型,并分析了环境温度、敷设功率以及绝热层对实时融雪效果的影响^[35]。

2 路面发热系统

2.1 发热材料

发热电缆是利用电流的热效应原理发热的,因此发热材料性能将直接影响发热电缆发热效果,电热型自融雪路面的发热体应具有以下特性:

- (1)具有较高的电热转化效率,能将外界输入的电能高效地转化为热能。
- (2)具有较高的强度及抗疲劳特性,能承受车辆荷载持续产生的压应力及剪应力而保证工作性能不受影响。
- (3)耐高温、耐腐蚀、防水,在高温条件下仍保持材料性质、电热性能不改变。
- (4)具有一定的变形能力,能够适应不同的道路地形。

以往的研究通常采用金属电缆线,如管数园^[35]和武海琴^[23]均采用金属电缆线进行了融雪研究,融雪效果良好,但金属电缆线价格昂贵且易受压发生弯折断裂,无法长时间承受车辆荷载,并不是融雪路面发热理想材料。近年来,许多学者开始选用碳纤维发热线或碳纤维布用于电热型自融雪路面研究,如任昭采用碳纤维布作为发热热源应用于融雪路面

中,取得了良好的效果^[38]。碳纤维材料电热转化率比金属丝、碳化硅等常见电热体的热效率高出 30%左右,且具有强度高、耐热性好、抗腐蚀、抗疲劳、抗蠕变的特点。

碳纤维发热线在使用过程中,往往会承受机械荷载以及化学腐蚀等外界因素影响,所以通常会在线缆外部裹覆一层绝缘材料作为保护层,目前常见的保护层材料有聚氯乙烯(PVC)、铁氟龙和硅橡胶等。鲍梦捷总结了不同保护层材料的优缺点,如表 1 所示^[39],可见,不同保护层材料适用条件有所区别,优缺点明显。此外,杨飞发现在使用硅橡胶碳纤维发热线时,若需要施加较大电流,应当避免发热线直接暴露在空气中^[40]。在选择发热线时,应根据各类材料优缺点以及实际施工情况选择。

表 1 发热线缆保护层材料优缺点		
Tab. 1 Advantages and disadvantages of protective layer materials for heating cable		
保护层材料	优点	缺点
聚氯乙烯(PVC)	耐高温、抗老化、防水性好	在酸碱、热油、有机溶剂中耐久性较差
硅橡胶	柔韧性好、耐高温	易产生机械破坏,造成短路
铁氟龙	耐高温,阻燃性好,受温度、酸碱、有机溶剂影响小	生产成本低

2.2 埋设深度

热量从道路结构内部传递到表面的过程中,传导介质的厚度即是发热体埋设的深度。融雪化冰的过程是一个温度传导的瞬态过程,非稳态场的热量传递过程伴随着能量损失,发热体的埋设深度对于路表温变特性的影响不仅在于传递时间,也在于传递过程中的能量损失。因此,发热体的埋设深度是决定路面融雪效果的重要因素之一,埋设深度应从两方面进行考虑:

- (1)埋设深度对融雪效果的影响
- 研究发现:当介质层材料相同并且采用相同的输入功率时,路表升温速率与埋设深度成反比,即发热体埋置越深其升温速率越小^[41]。即埋设深度越浅,传热速率越大,路表升温速率也就相应增大,如图 3 所示。从这一角度看,发热体的埋设深度应在保证其耐久性的情况下尽可能小,此时发热线的埋设深度将由上面层的层厚决定。
- (2)面层最小厚度

道路的面层是直接承接车辆荷载及外部环境的结构层,面层的厚度及质量将直接影响行车质量以及驾驶舒适度,不能因为盲目追求导热效率而过分

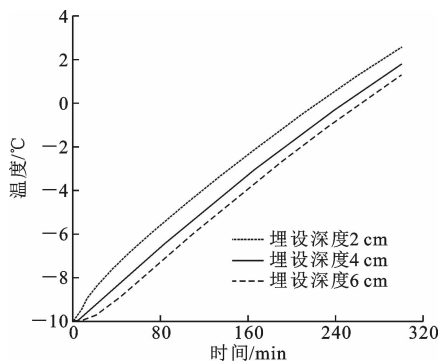


图 3 不同埋设深度与升温速率的关系^[41]

Fig. 3 Relationships between different burial depth and temperature rise rate

地减少面层厚度。对于水泥混凝土路面,常通过设置钢筋网固定发热线并增强导热性能,由于融冰雪的混凝土路面板处在冻融循环的环境中,应考虑钢筋的混凝土保护层最小厚度。

因此,在考虑发热体埋设深度时,应该综合考虑这两方面因素,在不影响道路正常使用以及发热体耐久性的前提下,尽量减小埋设深度。

2.3 布设间距

由于融雪路面供电源一般设置在道路两侧,为方便发热体与电源相接,发热体通常垂直于道路行车方向横向布设。不同布设间距对路面升温效果的影响不同,在输入功率相同的情况下,发热体布设间距越小、越密集,路表温度上升速度越快,可以在短时间内达到需要的发热温度。但当发热体布置的过于密集时,会导致路面某一区域温度过高,造成热量浪费。同时,Liu 等研究发现,不合理的布设间距会对沥青路面层间剪切强度产生不利的影响,影响道路使用寿命^[42-43]。同理,李侠研究发现,在发热体布设间距过大、过于稀疏时,会造成道路表面温度分布不均匀,路面温度呈“鞍形”分布^[44]。此时由于路表温度分布不均,使得路面积雪间隔分布,路面摩擦因数不连续,容易造成车辆频繁打滑失去控制,影响驾驶安全。因此,合理地设置布设间距十分重要。

为了确定路面结构中发热体的合理布设间距,需要考虑路面融冰化雪时的路面温度均匀性^[45-46],在实际工程应用中,面层材料、发热体直径不同时,传热效率存在差异,应根据实际材料及布设参数,通过试验^[23,28]或进行有限元建模^[37]分析,使得加热后升温速度和表面最大温差均在合理范围内,此时即为合理的布设参数。赵宏明认为当表面最大温差小于 1.5 °C 时,其温度均匀性满足要求^[28]。Liu 等基于多目标优化的遗传算法,以总加热时间和能量损

失率作为预测响应面,寻找埋设深度、间距、加热功率和环境风速的最优取值^[47]。

2.4 输入功率

发热体输入功率越大,单位时间、单位面积上产生的热量越多,能够保证路面升温过程中获得充足的能量,道路结构层及表面升温的速度越快,这对减少预热时间和提高融雪效果是有利的。输入功率计算如下

$$P_p = \frac{P_t}{S} = \frac{PL}{S} = \frac{I^2 RL(d)}{S} = \frac{UIL(d)}{S} \quad (5)$$

式中: P_p 为输入功率; P_t 为路面融雪所需的总功率; S 为路面的铺装面积; P 为电热丝的发热功率; L 为发热体的布设总长度; d 为发热体的布设间距; $L(d)$ 为布设总长度与布设间距的函数关系表达式; R 为发热体电阻; U 为输入电压; I 为电流。

增大输入功率有 3 种方式:在保证输入电压不变的情况下,通过减小发热体的电阻,即选用含有更多发热丝的碳纤维发热线;通过减小发热体的布设间距;通过提高发热体两端的输入电压。

在设计道路输入功率时,应从融雪时所需的最小能量出发,计算最小输入功率,然后根据实际情况乘以适当的富裕系数。

3 路面导热系统

3.1 导热混凝土

导热混凝土是指在普通混凝土的制备过程中掺加一定量热的良导体材料,如钢渣、石墨烯、碳纤维、钢丝绒等复合相填料^[24]替代集料或矿粉,从而提高混凝土的导热性能。

3.1.1 材料组成设计

(1) 结合料(水泥、沥青)

导热混凝土根据结合材料的不同,可以分为导热水泥混凝土和导热沥青混凝土,两者均可用于道路除冰雪路面,只是在进行配合比设计时存在一定差异。

对于以水泥为结合料的导热混凝土,导热特性不仅与导热相填料的材料及掺量有关,还与混凝土骨料体积分数、养护条件、水灰比、砂率、含湿量有关^[48-49],在进行配合比设计时,应综合考虑相关因素对导热性能的影响。

在用于电热型融雪路面时,2 种材料路面对加热的升温 and 稳态影响不大。虽然混凝土的导热系数比沥青混凝土大,导热效果相对更好,但是在路面铺筑时,水泥混凝土比沥青混凝土厚、密度大,在吸热过程中自身吸收的热量也大,因此 2 种不同的道路

路面铺装的加热效果是相似的。在选择结合料时,可以根据其他要求如工程造价、路用性能等进行选择。

(2) 导热相填料

导热混凝土是一种复杂非均质介质,由于微观结构中不同颗粒间的导热能力存在差异^[49],不同材料、不同形状的填料对混凝土的导热性能影响差异较大。目前常用的高导热填料有石墨、碳纤维、钢渣、钢纤维等^[50-51]。不同材料优缺点存在差异,纤维类材料(如钢纤维、碳纤维)等导热性能好,但不易分散、施工和易性差,如表 2 所示。因此,在选择导热相材料时,应综合考虑其优缺点进行选择。

表 2 导热相材料优缺点对比

Tab. 2 Comparisons of advantages and disadvantages of thermal conductive materials

材料	文献来源	形状	优点	缺点
石墨	Nguyen 等 ^[52] 、Pan 等 ^[53]	粉末	石墨混凝土具备良好的导热性和永久变形阻力	水稳定性较差,不易分散,需要使用特殊方法进行分散混合
碳纤维	Abtahi 等 ^[54] 、Zhang 等 ^[55]	纤维	碳纤维混凝土具备良好的导热性能的同时,还可提高混凝土动态模量、抗冻融性	不易分散,容易成团且成本较高
钢纤维	García 等 ^[56] 、Serin 等 ^[57]	纤维	钢纤维混凝土具有较好的导热性、导电性,可以改善沥青混凝土的水损害、反射裂缝等	和易性差,容易成团且成本较高
钢渣	Jiao 等 ^[58] 、Park 等 ^[59]	颗粒	钢渣混凝土导热效果好、强度高、成本低、经济效益好	吸水率大,低温性能比传统混凝土较差

导热混凝土导热性能与导热相掺量直接相关,当所制备的复合材料导热性能最优时的导热相填料掺量值称为渗流阈值^[60],超过这个阈值后,导热相填料的掺量增加产生的效果不再显著,此时应从混凝土力学性能、耐久性等方面确定导热相填料具体掺量。

(3) 集料

集料在混凝土体系中起着骨架结构作用,含量最多,体积分数最大,不仅对混凝土的导热系数影响较大,而且对路用性能起到决定性作用。粗、细集料对于不同混凝土的影响程度不同。刘凯等研究发现,细集料对水泥混凝土导热性能的影响远小于粗集料^[48]。Gao 等发现不同粒径细集料对沥青混凝土导热性能也存在不同影响,2.36 mm 粒径集料热效应最为明显^[61]。因此,对于导热沥青混凝土,需要考虑不同级配对导热性能的影响。

3.1.2 导热性能评价指标及测试方法

导热系数作为混凝土热物理性能的重要参数,对混凝土结构的温度分布及传热效果起着决定性作用,是衡量材料导热性能的评价指标,对融雪路面的设计至关重要。其物理意义是在单位温差下,单位厚度的材料在单位时间内通过单位面积传递的热量。

(1) 试验法

混凝土导热系数常用的测定方法如表 3 所示,主要包括稳态法和非稳态法两大类,其中稳态法又分为热流计法和防护热板法等,非稳态法包括热线法(十字热线法和平行热线法)、瞬态热脉冲法、瞬态平板热源法等^[61]。对于水泥混凝土和沥青混凝土均可以采用这类试验方法对导热系数进行测定。

表 3 混凝土导热系数常用测试方法

Tab. 3 Common test methods for thermal conductivity of concrete

试验原理	试验方法	优点	缺点
稳态法	热流计法、防护热板法、对比法等	原理相对简单、计算简便、精度也较高	耗时较长、对试件的制备精度要求较高,不适用于潮湿非均质材料
非稳态法	热线法、瞬态热脉冲法、瞬态平板热源法等	测试范围大、适用材料广、测试温度高、速度快、对环境要求较低	准确性和可重复性较差

(2) 理论法

沥青混凝土导热系数的测试方法较多,测试原理及测试条件的不同使得测试结果具有一定差异。理论推算方法完全根据材料组成特性计算出理论参考值,一方面可以消除试验误差,另一方面可以与实际测量值进行相互验证,进而验证试验数据的可靠性。

如利用 Williamson^[62]提出的沥青混凝土导热系数预估模型的理论计算公式进行计算

$$\lambda_{ac} = \lambda_b V_b \lambda_m V_m \lambda_a V_a \lambda_w V_w \tag{6}$$

式中: λ_{ac} 为沥青混合料的导热系数; λ_b 、 λ_m 、 λ_a 、 λ_w 分别为沥青、矿料、空气和水的导热系数; V_b 、 V_m 、 V_a 、 V_w 分别为沥青混合料中沥青、矿料、空气和水所占的体积百分比。

通过式(6)可以对试验测得的导热系数数据进行验证。

(3) 模型计算法

混凝土材料的导热系数可以通过上述试验方法直接测量得到,但在试验过程中不可避免会存在一定的偶然误差。通过对试验法得到的材料组成及发热试验基础数据进行建模分析^[63],可以最大限度减

小偶然误差对导热性能测试结果的影响,并且利用模型对各参数影响程度进行分析评价,确定各因素对材料导热系数的影响程度^[64],通过调整材料制备过程中各因素的比例进而达到优化材料导热系数的目的。

3.2 层位组合

3.2.1 导热层

如图 1 所示,电热型自融雪路面的融雪原理是将发热体产生的热量传导到路面达到融雪化冰的目的,因此导热层的布设十分重要。如第 3.1 节中所述,导热混凝土作为导热层主要材料,为尽量减小导热层厚度、保证融雪效率,电热型自融雪路面的导热层一般直接作为道路面层使用。

目前电热式融雪路面层位组合主要有单层结构和多层结构 2 类,如图 4 所示。两者优缺点明显,在图 4(a)单层结构中,面层由单一材料的导热层组成,面层传热效率一致,在进行材料组成设计时只需考虑 1 层的厚度即可,但由于发热体上下层位导热性能一致,会造成能量利用率的降低,并且大大增加成本。图 4(b)多层结构是在导热层厚度一定的情况下,将其分为不同厚度的层,单独对各层材料进行组成设计,使得各层之间导热系数不同,热量向下传导的部分减少,降低成本的同时可以提高能量利用效率,并且可利用各层之间的导热性能差异增大某一方向热量传导效率实现靶向导热^[38];缺点是在设计时较为繁琐,需要对每层位的材料及厚度进行单独设计。

3.2.2 隔热层

热量的传导是多方向的,在电热型自融雪路面中主要考虑向上传导至面层和向下传导至路基 2 个方向,从理论上来说 2 个方向的能量是一样的,但为提高能量利用效率和防止路面加热后的温度对路基以下可能存在的冻土造成冻融破坏,应尽量减少能量向下传导占比,提高向上传导比例。通过试验和有限元软件进行分析发现:在路面结构层中设置隔热层可以加快路表温度的上升,即通过减少能量的向下传导提高了向上传导能量的比例,使得更多的能量用于融化路面冰雪,进而提高了能量的利用率。赵宏明研究发现,无隔热层混凝土板只占有隔热层混凝土板升温幅度的 50%~60%^[28]。

对于设置隔热层的材料,刘凯研究发现采用挤塑聚苯乙烯板作为隔热层,可以显著提高表面温度上升速度^[65];Yang 等在加热体下布设 1 层铝箔薄膜用作隔热材料,向上反射发热体产生的热量,提高

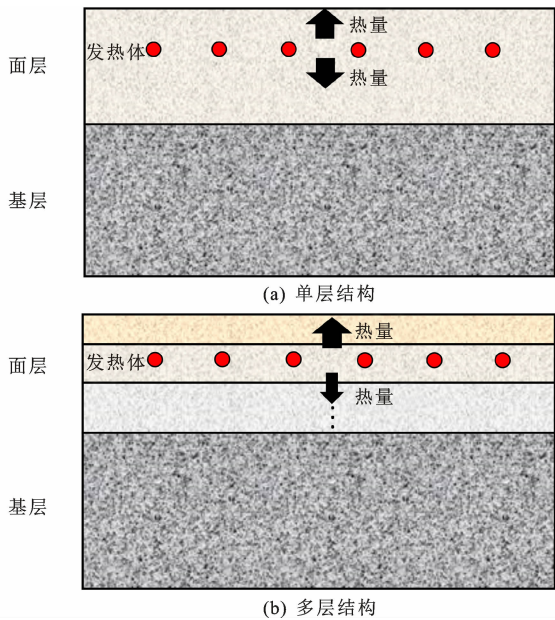


图 4 不同路面结构层位组合

Fig. 4 Different pavement structure layers combination

了路面整体的导热效果^[3]。但无论采用哪种材料,除隔热效果外,均要考虑其强度及层间黏性是否满足路用性能要求。

3.3 融雪效果评价方法

通常采用无雪面积比(snow-free area ratio)作为指标对路面融雪效果进行评价,美国采暖制冷与空调工程师协会^[66]推荐该指标计算如下

$$A_r = \frac{A_f}{A_t} = 1 - \frac{A_s}{A_t} \tag{7}$$

式中: A_r 为无雪面积比; A_f 为无雪面积; A_t 为观测部分总面积; A_s 为积雪面积。

根据式(7)可知: $0 \leq A_r \leq 1$,当 $A_r = 0$ 说明此时积雪完全未融化, A_r 越大说明融雪面积越大;当 $A_r = 1$ 时,可以认为此时雪融化的足够快,不会发生积雪。而对于面积值的计算,在具体应用中,通常采用高分辨率数码相机对应区域内的动态融雪过程进行观察和捕获,然后利用图像处理技术对无雪区域内的图像像素数与总像素数的比率来计算得到无雪面积比^[67]。

但这种评价方法存在一定局限性, A_r 在一定程度上可以反映道路表面融雪的程度,但无法根据特定的 A_r 值,判断当前道路的融雪状态是否满足要求,如图 5 所示,2 种工况下 A_r 相同,但显然在工况 1 情况下,表面摩擦因数连续变化,行车安全性能低于工况 2。

鉴于无雪面积比方法存在的弊端,近年来也有研究人员提出采用对路面加热特征点进行观测的方

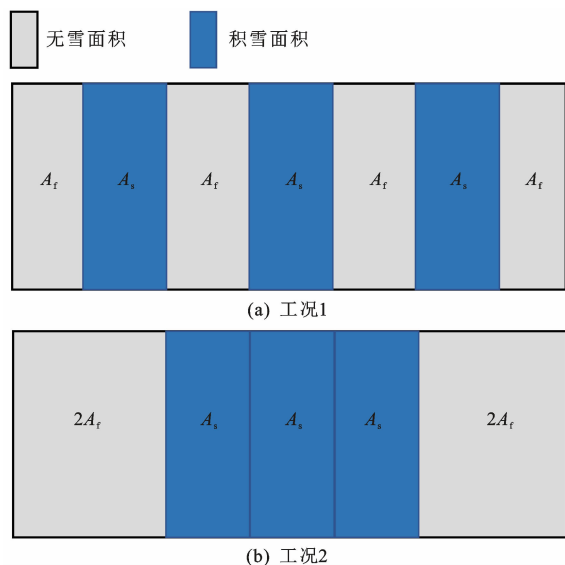


图5 无雪面积比方法示意

Fig. 5 Snow-free areas ratio method

法判断融雪效果。如黄思路将平均温度以及温度不均匀系数与无雪面积比法相结合提出了一种新的融雪评价指标^[68],但这类方法需要在道路内部埋设一定数量传感器,成本较高。

总体而言,目前对于融雪效果评价指标的研究还较少,没有形成系统性的研究成果,未来可以针对这方面重点进行研究。

4 结 语

(1)融雪传热模型可以降低试验次数,确定道路设计的最佳方案,同时也可以对设计的道路实际融雪效果进行模拟预测。影响模型准确性的因素主要包括冰/雪-水相变、多场耦合、实际工况等,在不同的道路环境中,这些因素的影响程度不尽相同,应根据设计道路所处环境具体分析,对模型进行取舍简化。

(2)电热型自融雪路面分为路面发热系统和路面导热系统两部分,两者共同影响路面的融雪效率:路面发热系统是整个路面的关键,路面的融雪效率主要取决于发热材料、埋设深度、布设间距以及输入功率,应根据实际情况选取合适的布设参数;路面导热系统主要包括导热材料设计和层位组合,导热材料可以显著提高融雪效率,合理的层位组合也可以在一定程度上达到节约能源、提高效率的效果。

(3)当前研究重点主要集中于导热材料组成、系统参数及环境因素影响,对能源利用率、路用性能以及融雪效果评价的研究较少。而能源利用效率和路用性能是制约其大面积应用的重要原因。在未来,电热型融雪路面应从融雪效果评价、耗能评价、施工

难度、路用性能等方面展开研究,建立融合“结构与材料-路用性能-融雪功能-运行能耗”的平衡设计方法,从而最大化地降低其建设、运行以及维护成本,使其能更经济、科学、合理地应用于道路工程中。

参考文献:

References:

- [1] 邵 阳. 积雪冰冻条件下互通式立交匝道平纵指标研究[D]. 西安:长安大学,2019.
SHAO Yang. Study on the vertical and horizontal index of highway interchange ramp undersnow and frozen conditions[D]. Xi'an:Chang'an University,2019.
- [2] 张成博. 冰雪条件下高速公路交通态势预估及智能管控技术[D]. 长春:吉林大学,2020.
ZHANG Cheng-bo. Traffic situation prediction and intelligent control technology of expressway under ice and snow pavement conditions[D]. Changchun: Jilin University,2020.
- [3] YANG J, ZHU X Y, LI L H, et al. Prefabricated flexible conductive composite overlay for active deicing and snow melting[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(11):04018283.
- [4] FWA T F, ONG G P. Wet-pavement hydroplaning risk and skid resistance: Analysis [J]. Journal of Transportation Engineering, 2008, 134(5):182-190.
- [5] 余豫新. 路面主动融冰(雪)技术的发展与展望[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(增1):86-89.
YU Yu-xin. Development and prospect of pavement active ice (snow) melting technology[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2011, 45(S1):86-89.
- [6] 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 Yi-qiu, ZHANG Chi, XU Hui-ning, 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.
- [7] 刘 敏. 融雪剂撒布车辆的路径规划问题研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
LIU Min. Research on vehicle routing problems for spreading of deicing salt[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [8] SASSANI A, ARABZADEH A, CEYLAN H, et al. Factorial study on electrically conductive concrete mix design for heated pavement systems[C]//TRB. Proceedings of Transportation Research Board 96th Annual Meeting. Washington DC: TRB. 2017:1-16.

- [9] SHEN W B, CEYLAN H, GOPALAKRISHNAN K, et al. Life cycle assessment of heated apron pavement system operations[J]. Transportation Research Part D, 2016, 48: 316-331.
- [10] 刘西雷. 自应力弹性沥青混凝土除冰技术研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2011.
LIU Xi-lei. Flexible asphalt concrete of self-stress for ice deicing technology [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011.
- [11] 孙 帅. 聚氨酯橡胶颗粒混合料自应力除冰雪应用研究[D]. 天津:河北工业大学, 2014.
SUN Shuai. Applied study on eliminating snow by self-stress of polyurethane rubber particles mixture [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014.
- [12] LIU Z Z, HOFF I, SHA A M. Effects of the softening point of hydrophobic polymers on the salt-based filler used in antifreeze asphalt concretes[J]. Materials & Design, 2021, 204: 109663.
- [13] 刘状壮, 沙爱民, 蒋 玮. 蓄盐沥青路面研究进展: 盐化物材料、混合料及其性能与评价[J]. 中国公路学报, 2019, 32(4): 18-31, 72.
LIU Zhuang-zhuang, SHA Ai-min, JIANG Wei. Advances in asphalt pavements containing salts: Additives, mixtures, performances, and evaluation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(4): 18-31, 72.
- [14] ARABZADEH A, CEYLAN H, KIM S, et al. Super-hydrophobic coatings on Portland cement concrete surfaces[J]. Construction and Building Materials, 2017, 141: 393-401.
- [15] CEYLAN H, ARABZADEH A, SASSANI A, et al. Innovative nano-engineered asphalt concrete for ice and snow controls in pavement systems[C]//Confea. Proceedings of 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress. Prague; Confea, 2016: 1-18.
- [16] 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 Wen-bing, LI Shuang-yang, FENG Wen-jie, 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.
- [17] 徐慧宁, 谭忆秋, 傅忠斌, 等. 太阳能-土壤源热能耦合道路融雪系统融雪性能的研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(9): 1391-1396.
XU Hui-ning, TAN Yi-qiu, FU Zhong-bin, et al. Study on snow melting performance in solar-ground source coupled snow-melting system for pavement [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2011, 32(9): 1391-1396.
- [18] 罗新欣. 内置碳纤维发热电缆的桥面融冰化雪技术研究[D]. 西安:长安大学, 2015.
LUO Xin-xin. A study of applied technology in deicing and melting snow on the bridge surface by built-in carbon fiber heating wire[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [19] WANG X Y, ZHU Y L, ZHU M Z, et al. Thermal analysis and optimization of an ice and snow melting system using geothermy by super-long flexible heat pipes[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112: 1353-1363.
- [20] YANG T. Experimental study on an electrical deicing technology utilizing carbon fiber tape[D]. Anchorage: University of Alaska, 2011.
- [21] HENDERSON D J. Experimental roadway heating project on a bridge approach[J]. Highway Research Record, 1965, 111(14): 14-23.
- [22] ZENEWITZ J. Survey of alternatives to the use of chlorides for highway deicing[R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 1977.
- [23] 武海琴. 发热电缆用于路面融雪化冰的技术研究[D]. 北京:北京工业大学, 2005.
WU Hai-qin. A study of applied technology in deicing and melting snow on road surface by electric heating cable[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2005.
- [24] HUANG B S, CHEN X W, SHU X. Effects of electrically conductive additives on laboratory-measured properties of asphalt mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, 21(10): 612-617.
- [25] 冯新军, 查旭东, 程 景. PAN基碳纤维导电沥青混凝土的制备及性能[J]. 中国公路学报, 2012, 25(2): 27-32.
FENG Xin-jun, ZHA Xu-dong, CHENG Jing. Preparation and performance of PAN-based carbon fiber conductive asphalt concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(2): 27-32.
- [26] 李 波. 导热沥青混凝土及其性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2008.
LI Bo. Properties investigation of thermal conductive asphalt mixtures [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
- [27] 徐慧宁. 流体加热道路融雪系统温-湿耦合融雪模型及仿真分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2011.
XU Hui-ning. Development and simulation of a heat and mass coupled snow melting model for hydronic heated pavement [D]. Harbin: Harbin Institute of

- Technology, 2011.
- [28] 赵宏明. 布置碳纤维发热线的混凝土路面及桥面融雪化冰试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2010.
ZHAO Hong-ming. Experimental investigation on concrete pavement and bridge deck deicing with carbon fiber heating wire[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [29] ROH H S. Heat transfer theory for thermal non-equilibrium, quasi-equilibrium, and equilibrium[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 64:661-670.
- [30] INCROPERA F, WITT D D. Fundamentals of heat and mass transfer[M]. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 1990.
- [31] FONT F, MICOU W, BRESME F. Non-equilibrium molecular dynamics and continuum modelling of transient freezing of atomistic solids[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 164:120601.
- [32] RINE A, DESMONS J Y, HARMAND S. Models for transient conduction in a flat plate subjected to a variable heat flux [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(2/3):492-500.
- [33] LIU X. Development and experimental validation of simulation of hydronic snow melting systems for bridges[M]. Stillwater: Oklahoma State University, 2005.
- [34] 樊玲. 结冰融冰过程的数值模拟[D]. 南京:南京航空航天大学, 2005.
FAN Ling. Numerical simulation of the process of icing/melting[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [35] 管数园. 电缆加热系统进行融雪的数值分析研究[D]. 上海:上海交通大学, 2008.
GUAN Shu-yuan. A simulation study of electric cable heating system used in de-snowing [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [36] LU S, REN T S, GONG Y S, et al. An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(1):8-14.
- [37] 尉学勇. 西藏高寒地区水泥混凝土路面太阳能融雪(冰)技术研究[D]. 西安:长安大学, 2011.
YU Xue-yong. Research on cement concrete pavement's solar energy snowmelt in Tibetan cold highland area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [38] 任昭. 基于碳纤维布热源的靶向导热路面结构与导热特性分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
REN Zhao. Structural design and thermal conductivity analysis of targeted heat conduction pavement based on carbon fiber sheet heat source[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [39] 鲍梦捷. 内置碳纤维融冰路面设计方法[D]. 西安:长安大学, 2017.
BAO Meng-jie. Study on deicing pavement of built-in carbon fiber heating wire [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [40] 杨飞. 碳纤维发热线用于道路除冰雪的技术研究[D]. 西安:长安大学, 2014.
YANG Fei. Research on carbon fiber heating wire for pavement deicing[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [41] 刘状壮, 张有为, 季鹏宇, 等. 电热型融雪沥青路面传热特性研究[J/OL]. 吉林大学学报(工学版), [2021-11-15]. DOI: 10. 13229/j. cnki. jdxbgxb20210671.
LIU Zhuang-zhuang, ZHANG You-wei, JI Peng-yu, et al. Study on heat transfer characteristics of electric heating snow melting asphalt pavement[J/OL]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), [2021-11-15]. DOI: 10. 13229/j. cnki. jdxbgxb20210671.
- [42] LIU K, ZHANG X, GUO D D, et al. The interlaminar shear failure characteristics of asphalt pavement coupled heating cables [J]. Materials and Structures, 2018, 51(3):67-80.
- [43] 梁增洁. 智能化融冰路面技术研究与工程应用[D]. 西安:长安大学, 2016.
LIANG Zeng-jie. Research and engineering application of intelligent ice melting pavement technology [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [44] 李侠. 水热型融雪路面金属导热管合理埋设间距研究[J]. 冰川冻土, 2015, 37(4):1023-1027.
LI Xia. Study of reasonable distances between metal pipes buried in road-surface which able to melt snow with running warm water [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(4):1023-1027.
- [45] 车广杰. 碳纤维发热线用于路面融雪化冰的技术研究[D]. 大连:大连理工大学, 2008.
CHE Guang-jie. A study of applied technology in deicing and melting snow for road surface by carbon-fiber electrical heating wire [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [46] 许庚. 基于内置电加热方式的路面表面物理除冰雪技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
XU Geng. Research on ice and snow removing technique on pavement surface through built-in electric heating [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [47] LIU K, HUANG S L, XIE H Z, et al. Multi-objective

- optimization of the design and operation for snow-melting pavement with electric heating pipes[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 122: 359-367.
- [48] 刘凯,王芳,王选仓. 水泥混凝土导热性能影响因素及预估模型研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(6): 771-777.
LIU Kai, WANG Fang, WANG Xuan-cang. Influence factor of thermal conductivity of cement concrete and its prediction model[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(6): 771-777.
- [49] 王莹莹,马超,刘艳峰,等. 含湿量对混凝土导热系数的影响分析[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(4): 595-599.
WANG Ying-ying, MA Chao, LIU Yan-feng, et al. Effect of moisture content on thermal conductivity of concretes[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(4): 595-599.
- [50] FURMANSKI P, LAPKA P. Micro-macro heat conduction model for the prediction of local, transient temperature in composite media [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2020, 154: 106401.
- [51] SENGOZ B, TOPAL A, GORKEM C. Evaluation of moisture characteristics of warm mix asphalt involving natural zeolite[J]. Road Materials and Pavement Design, 2013, 14(4): 933-945.
- [52] NGUYEN Q T, DI BENEDETTO H, SAUZEAT C. Determination of thermal properties of asphalt mixtures as another output from cyclic tension-compression test[J]. Road Materials and Pavement Design, 2012, 13(1): 85-103.
- [53] PAN P, WU S P, HU X D, et al. Effect of freezing-thawing and ageing on thermal characteristics and mechanical properties of conductive asphalt concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017, 140: 239-247.
- [54] ABTAHI S M, SHEIKHZADEH M, HEJAZI S M. Fiber-reinforced asphalt-concrete—A review[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(6): 871-877.
- [55] ZHANG D R, BIRGISSON B, LUO X, et al. A new long-term aging model for asphalt pavements using morphology-kinetics based approach[J]. Construction and Building Materials, 2019, 229: 117032.
- [56] GARCÍA A, NORAMBUENA-CONTRERAS J, PARTL M N, et al. Uniformity and mechanical properties of dense asphalt concrete with steel wool fibers[J]. Construction and Building Materials, 2013, 43: 107-117.
- [57] SERIN S, MOROVA N, SALTAN M, et al. Investigation of usability of steel fibers in asphalt concrete mixtures [J]. Construction and Building Materials, 2012, 36: 238-244.
- [58] JIAO W X, SHA A M, LIU Z Z, et al. Study on thermal properties of steel slag asphalt concrete for snow-melting pavement[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277: 123574.
- [59] PARK P, REW Y, BARANIKUMAR A. Controlling conductivity of asphalt concrete with graphite[R]. Austin, Texas A & M Transportation Institute, 2014.
- [60] 唐祖全,李卓球,钱觉时. 碳纤维导电混凝土在路面除冰雪中的应用研究[J]. 建筑材料学报, 2004, 7(2): 215-220.
TANG Zu-quan, LI Zhuo-qiu, QIAN Jue-shi. Application of carbon fiber reinforced conductive concrete for melting ice and snow on road surface[J]. Journal of Building Materials, 2004, 7(2): 215-220.
- [61] GAO J, SHA A M, WANG Z J, et al. Utilization of steel slag as aggregate in asphalt mixtures for microwave deicing[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 152: 429-442.
- [62] WILLIAMSON R H. Effects of environment on pavement temperatures[J]. Intl Conf Structural Design Proc, 1972(1): 144-202.
- [63] KIM K H, JEON S E, KIM J K, et al. An experimental study on thermal conductivity of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(3): 363-371.
- [64] LEE J H, LEE J J, CHO B S. Effective prediction of thermal conductivity of concrete using neural network method[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2012, 6(3): 177-186.
- [65] 刘凯. 融雪化冰水泥混凝土路面研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
LIU Kai. Study on cement concrete pavement of snow melting and deicing[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [66] CHR S C, CHR D. American society of heating, refrigeration and air-conditioning engineers, inc[J]. TC, 1995, 404: 636-8400.
- [67] WANG H J, LIU L B, CHEN Z H. Experimental investigation of hydronic snow melting process on the inclined pavement[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 63(1/2): 44-49.
- [68] 黄思路. 电热管融冰雪路面热能特征分析及评价方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
HUANG Si-lu. The study on thermal characteristics and evaluation method of snow-melting pavement with electric heating pipes[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.