

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.04.008

流体加热道路融雪系统的设计热负荷

徐慧宁¹, 谭忆秋¹, 周纯秀²

(1.哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 150090 哈尔滨; 2.大连海事大学 交通与物流工程学院, 116026 辽宁 大连)

摘 要: 为了提高流体加热道路融雪系统设计的可靠性,开展了流体加热道路融雪系统设计热负荷的研究. 基于自行开发的道路融雪系统融雪模型,采用数值仿真分析方法探讨了系统运行参数、环境参数等因素对系统融雪效果的影响;在此基础上,依据我国气候特点开展了流体加热道路融雪系统设计热负荷的探讨. 研究表明:预热时间、单位面积输入热负荷、道路材料、埋设管材显著影响降雪开始时刻道路结构温度场、单位面积输入能量、沿程能量损失、热量传递到上表面所需时间及热量传递能力,因此,可通过调整系统运行参数及道路设计参数达到优化融雪效果的目的;另一方面,地点不同达到相同融雪效果所需热负荷不同. 依据我国降雪分布特点及近 30 a 气象数据,提出了针对我国不同地区的流体加热道路融雪系统设计热负荷参考值,为今后我国流体加热道路融雪系统的设计提供依据.

关键词: 流体加热道路融雪系统;融雪模型;融雪效果;影响因素;设计热负荷

中图分类号: U44 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2015)04-0044-08

Design of hydronic snow melting systems for pavement

XU Huining¹, TAN Yiqiu¹, ZHOU Chunxiu²

(1.School of Traffic Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;

2.Transportation and Logistics Engineering College, Dalian Maritime University, 116026 Dalian, Liaoning, China)

Abstract: To improve the design reliability of hydronic snow melting system, design alternative of hydronic snow melting systems for pavement in China is discussed. Based on the heat and mass coupled snow melting model, the effect of idling time, heat fluxes, pipe material, meteorological condition and control strategy on the snow melting performance has been investigated. The design alternative for hydronic snow melting system also has been proposed. Results indicated that idling time, input heat flux, thermal properties of pavement materials and embedded pipe play an important role on snow melting performance. Thus, it is possible to adjust the operation parameters and pavement design parameters to optimize the snow melting performance. Meanwhile, location and target performance also affect the required design alternative. According to the weather data corresponding to snow event from 1981 to 2010, the required heating load for hydronic snow melting system in China is suggested. The proposed heating load will give a lot of suggestion in the designation of hydronic heated system for pavement in China.

Keywords: hydronic snow melting systems for pavement; snow melting model; snow melting performance; influencing factors; design heating load

应用流体加热道路融雪系统主动防止路面积雪结冰在过去几十年间被各国学者相继提出. 此方法旨在将各种形式的热能输送至路表,达到融

冰化雪的目的,不仅可以消除融雪剂对道路设施的腐蚀,而且可以依据气象条件、交通等级进行有针对性的运行,保障交通安全.

融雪系统输入热负荷的设计是开展流体加热道路融雪系统设计的最主要环节. ASHRAE 设计手册(2003)采用修正的 Chapman 一维稳态融雪模型^[1]分析了美国 46 个代表性城市 1982—1993 年的气象数据,针对典型桥面结构基于融雪效果

收稿日期: 2014-01-17.

基金项目: 国家自然科学基金(51208154);
中国博士后科学基金(2013M530160).

作者简介: 徐慧宁(1983—),女,博士,副教授;
谭忆秋(1968—),女,教授,博士生导师.

通信作者: 徐慧宁, xhn1983@163.com.

为分别 75%, 90%, 95%, 98%, 99% 和 100% (无雪时间比) 时制定了相应的单位面积系统设计热负荷^[2]. 2005 年, Liu 采用其所建立的二维瞬态融雪模型针对不同系统预热时间、不同融雪目标提出了基于融雪效果的典型道路结构设计融雪热负荷, 修正了 ASHRAE 设计手册(2003) 由于稳态计算假设造成的误差, 上述研究为该项技术在美国的推广应用提供了可靠的技术支持^[3]. 目前, 流体加热道路融雪技术在我国尚处于初级阶段, 现有研究多集中于温度特性的分析^[4-7], 尚未有关于流体加热道路融雪系统设计热负荷的研究. 然而, 我国地域辽阔, 气候多变, 降雪分布区域性强, 对于流体加热道路融雪系统设计热负荷的研究显得尤为迫切.

本文基于自行开发的道路融雪系统融雪模型, 采用数值仿真分析方法开展流体加热道路融雪系统设计热负荷的研究. 首先, 基于我国降雪分布特点, 选择代表性城市作为研究对象, 分析代表性城市的极限降雪特点; 随后, 依据建立的温-湿耦合融雪模型, 在我国典型道路结构基础上, 开展流体加热道路融雪系统融雪效果影响因素的研究, 分析天气状况、系统运行参数等因素对融雪效果的影响; 在此基础上, 针对不同地区气候特点与降雪特性的差异, 探讨我国不同地区流体加热道路融雪系统单位面积设计热负荷, 为今后流体加热道路融雪系统的设计提供参考.

1 流体加热道路融雪系统融雪模型

1.1 水分迁移模型的建立

1.1.1 水分迁移控制方程

1957 年, Philip 基于达西定律提出了考虑水分和温度梯度的水分迁移方程^[8] 为

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{wx} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{wy} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{tx} \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{ty} \frac{\partial t}{\partial y} \right) - \frac{\partial K}{\partial y} \quad (1)$$

其中: D_{wx} , D_{wy} 分别为 x 方向与 y 方向的等温水分扩散系数, cm^2/s ; D_{tx} , D_{ty} 分别为 x 方向与 y 方向的非等温水分扩散系数, $\text{cm}^2/(\text{s} \cdot ^\circ\text{C})$; x, y 为直角坐标, cm ; K 为导水率, cm/s ; θ 为含水量, cm^3/cm^3 ; t 为温度, $^\circ\text{C}$.

1.1.2 边界条件的确定

道路上表面暴露于自然环境中, 经受着风、霜、雨、雪的共同作用. 计算中, 进入路表的水流量 m' 由存在于路表的水流量 R_{total} 和材料最大吸收能力 S_{max} 决定, 即

$$m' = \min(R_{\text{total}}, S_{\text{max}}) \quad (2)$$

由于加热时间短, 材料的导水能力弱, 计算中忽略下表面水分变化, 近似认为下表面含水量为常数. 侧边界条件的处理考虑了埋管结构对称性, 认为侧边界水平方向水流量为 0.

1.1.3 道路材料水力参数的确定

研究中, 基质势 ψ 采用下式所示由 Brooks 推导的基质势解析解进行计算^[9], 导水率依据 Mualem 于 1976 年提出的非饱和导水率计算方法而得^[10].

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{\psi}{\psi_a} \right)^{-a} \quad (3)$$

$$K_{\text{mat}} \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{n+2+\frac{2}{a}} = K \quad (4)$$

其中: ψ_a 为空气进入张力, m ; θ_s 为道路材料饱和含水量, m^3/m^3 ; θ_r 为残余含水量, m^3/m^3 ; a 为空隙分布系数; ψ 为基质势, m ; K_{mat} 为物质饱和导水率, m/s ; n 为内部连通空隙系数.

基于多孔介质理论与 Darcy 定律, Philip 推导了水分扩散系数的计算方法^[8]. 多孔介质的水分扩散系数主要由 4 部分组成, 分别为等温汽态水分扩散系数 D_{wv} , 等温液态水分扩散系数 D_{wl} 、非等温汽态水分扩散系数 D_{tv} 与非等温液态水分扩散系数 D_{tl} .

$$D_{wv} = (1/\rho_w) D_0 \alpha b \rho_0 (\partial h_0 / \partial \theta), \quad (5)$$

$$D_{wl} = K (\partial \psi / \partial \theta), \quad (6)$$

$$D_{tv} = (1/\rho_w) D_0 \xi a h_0 (\partial \rho_0 / \partial T), \quad (7)$$

$$D_{tl} = K (\psi / \sigma) (\partial \sigma / \partial T). \quad (8)$$

其中: D_0 为水蒸气在空气中的扩散系数, $0.274 \text{ cm}^2/\text{s}$; α 为 Penman's 曲折因子, α 取 $2/3$ ^[11]; b 为空隙率, cm^3/cm^3 ; ρ_0 为饱和蒸汽密度, g/m^3 ; h_0 为相对湿度; ξ 为温度梯度修正系数, ξ 取 2.0 ^[11]; σ 为水的表面张力, N/m .

1.2 温度场模型的建立

道路结构内部热流主要包括热传递、水分迁移携带的热量以及水汽蒸发的耗热量, Taylor^[12]、Nakano^[13] 的研究指出, 热传导引起道路热量变化是水分迁移带走热量的 2~3 个数量级, 热参数变化导致的热量变化也显著高于水分迁移带走的热量, 因此, 本研究忽略水分传递对热流的影响, 依据 Fourier 定理和能量守恒定律, 道路结构传热微分方程可以表示为

$$C(\theta) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x(\theta) \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y(\theta) \frac{\partial t}{\partial y} \right) \quad (9)$$

其中: $\lambda_x(\theta)$, $\lambda_y(\theta)$ 分别为 x 方向与 y 方向的道

路材料导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; $C(\theta)$ 为道路材料的体积热容, $kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$.

体积热容由 De Vries 公式计算得到,与道路材料、液态水及空隙体积含量有关^[14],即

$$C(\theta) = C_s + C_{liq}\theta.$$

(10)

其中: C_{liq} 为液态水的体积热容, $J/(m^3 \cdot ^\circ C)$; C_s 为道路材料干燥状态下的体积热容, $J/(m^3 \cdot ^\circ C)$; θ 为道路材料的含水量, cm^3/cm^3 ; 道路材料的导热系数按下式由 Kersten 数计算得^[15]

$$\lambda = \lambda_{dry} + K_e(\lambda_{sat} - \lambda_{dry}).$$

(11)

其中: λ_{dry} 为道路材料干燥状态下的导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; λ_{sat} 为道路材料饱和状态下的导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; K_e 为 Kersten 数.

研究中沿用文献[3]中 Liu 对于表面状况的分类方法,受篇幅所限,不再赘述.

1.3 温-湿耦合融雪模型的计算方法

道路结构中热量的差异和改变引起了水分的迁移,同时,水分的迁移改变了材料的热物理特性,从而间接影响了道路结构的温度分布. 依据前面所建立的水分迁移模型和热量传递模型,基于道路材料为各向同性介质的假设,以含水量 θ 作为耦合项,建立流体加热道路融雪系统温-湿耦合数学模型,将温度场控制方程与水分场控制方程结合起来,构成耦合方程;采用 Fortran 语言

编写计算程序,依据显式差分格式求取数学模型的数值解. 采用等间距网格对研究区域进行划分,为了满足计算精度及收敛条件,模型的时间步长为 10~30 s. 基于实测数据对模型的准确性与合理性进行验证,详见文献[16].

2 我国降雪分布特点及代表性城市的选择

我国幅员辽阔,地形地貌复杂多变,上述因素造成了降雪分布全国范围的多样性及不均匀性. 胡汝骥对我国降雪分布特点进行了研究,依据地理位置、海拔、地形地貌、降雪性质、降雪量及降雪类型,将我国划分为 18 个特性各异的降雪区^[17]. 研究中,一方面考虑到青藏高原拥有大量永久性冻土,目前无法评价流体加热道路融雪技术对永久性冻土的影响;另一方面,阿拉善高原、塔里木盆地、四川盆地、华南丘陵区属于降雪稀少区^[17],因此,研究中暂不考虑上述 5 个区域. 在此基础上,选择各个降雪区域的代表性城市,考虑到不同地区气候特点的差异及由此造成的降雪特点的不同,研究中,基于 National Climatic Data Center 1980—2010 年^[18] 代表性城市日气象观测数据,进行降雪情况的统计分析,采用 95%可靠度的极限降雪情况作为研究条件,平均太阳辐射强度来源于 Building Technology Program 的统计数据^[19],结果见表 1.

表 1 代表性城市降雪特点

城市	95%极限降雪 时间/h	95%极限降雪 速率/ $(mm \cdot h^{-1})$	95%极限降雪 风速/ $(m \cdot s^{-1})$	95%极限降雪 温度/ $^\circ C$	年降雪频率/ $(次 \cdot a^{-1})$	白天太阳辐射强度/ $(W \cdot m^{-2})$
哈尔滨	24	0.4	10.7	-21.6	25.7	203
北京	24	0.4	11.5	-8.5	5.6	270
汉中	24	0.3	6.6	-4.0	1.1	183
合肥	24	0.9	11.3	-5.1	3.2	269
贵阳	24	0.8	8.3	-4.1	3.2	182
锡林浩特	24	0.3	11.9	-22.9	20.0	265
阿勒泰	24	0.7	8.0	-21.1	33.9	192
乌鲁木齐	24	0.6	6.6	-17.0	35.3	206
阿拉尔	24	0.4	4.2	-12.9	3.5	242
伊宁	24	0.6	5.8	-13.8	24.6	214

3 流体加热道路融雪系统运行效果影响因素

3.1 数值分析方法

基于我国典型道路结构(20 cm 沥青面层+40 cm水稳碎石),以不同降雪区代表性城市作为研究对象,采用动态融雪方式开展融雪效果影响因素的分析. 研究中,假设道路材料吸收系数为 0.87,埋管间距与埋深分别为 14、7 cm,管材导热系数为 $0.4 W/(m \cdot ^\circ C)$,道路材料干燥/饱和状态下的导热系数分别为 $1.0/1.4 W/(m \cdot ^\circ C)$ (沥青混凝土),

$1.2/1.5 W/(m \cdot ^\circ C)$ (水稳碎石);体积热容分别为 $2.3 \times 10^6/2.6 \times 10^6 J/(m^3 \cdot ^\circ C)$ (沥青混凝土), $1.5 \times 10^6/1.8 \times 10^6 J/(m^3 \cdot ^\circ C)$ (水稳碎石);道路材料的空隙分布系数分别假设为 3(沥青混凝土)和 2(水稳碎石),饱和导水率分别为 $1.2 \times 10^{-5} cm/s$ (沥青混凝土)和 $1.2 \times 10^{-4} cm/s$ (水稳碎石).

对于流体加热道路融雪系统融冰化雪的效果,研究中采用针对某一融雪目标(路面无雪面积占路面总面积的比率)的无雪时间比(降雪过程中,达到或优于目标路面融雪目标的时间占降雪总时间的比率)加以评价.

3.2 流体加热道路融雪系统融雪效果影响因素的分析

3.2.1 预热时间及单位面积输入热负荷对流体加热道路融雪系统融雪效果的影响

预热时间与单位面积输入热负荷是流体加热道路融雪系统重要的运行参数, 研究中以北京和哈尔滨两地作为研究对象, 进行了预热时间与单位面积输入热负荷对融雪效果的影响分析, 分析结果见图 1.

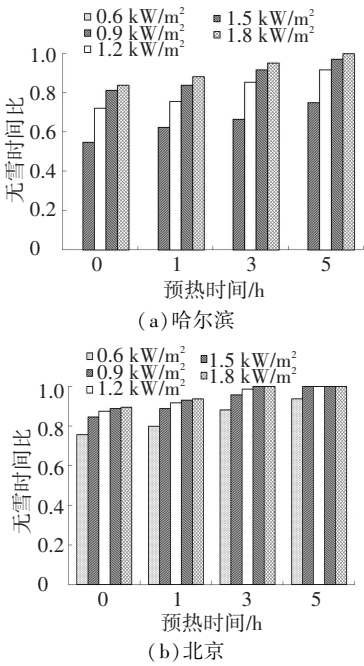


图 1 预热时间、单位面积融雪热负荷对融雪效果的影响

一方面, 随着系统预热时间的增加, 道路结构融雪效果得到显著的改善. 就图 1(a) 所示哈尔滨地区而言, 单位面积输入热负荷 0.9 kW/m^2 , 系统无预热条件下, 道路路表无雪时间占整个降雪时间的 54.9% ; 随着预热时间的增长, 融雪效果不断得到改善, 当系统预热 5 h , 该地区的融雪效果达到了 75.0% . 计算结果表明, 系统的预热提高了降雪初始时刻道路结构的整体温度, 缩短了道路表

面由环境温度到达积雪融化温度所需的时间. 另一方面, 道路结构单位面积输入热负荷也对融雪效果产生较大影响. 随着道路结构单位面积输入热负荷的增加, 道路结构升温速率加快, 道路表面由环境温度到达积雪融化温度所需的时间减少, 融雪效果得到改善. 图 1(a) 为哈尔滨地区, 单位面积热负荷 0.6 kW/m^2 且系统无预热时, 融雪效果为 0 ; 而在 1.8 kW/m^2 的单位面积输入热负荷作用下, 即使不进行预热, 融雪效果也可达到 84% . 上述研究显示, 合理选择单位面积融雪热负荷是进行流体加热道路融雪系统设计的关键.

此外, 虽然融雪的系统工况一致, 但北京与哈尔滨的融雪效果却存在显著的差异, 如图 1 所示. 在 0.6 kW/m^2 的热负荷且无预热时, 哈尔滨地区的融雪效果为 0 , 而北京地区, 则可达到 75.7% . 由此说明, 流体加热道路融雪系统的设计、运行受地理、气候因素影响较大, 宜根据城市所在地的具体气候、气象资料进行.

目前, 地热系统埋管材质主要有聚丁烯 (PB)、耐高温聚乙烯 (PERT) 等, 不同的管材导热系数不同, 换热量也有较大的差别. 研究中选择目前常用且导热系数具有显著差别的 4 种管材作为研究对象^[20]: 铝塑 PP-R, $0.25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; 过氧化物交联聚乙烯 (PEXA), $0.35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; 耐高温聚乙烯 (PERT), $0.40 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; 铝塑管, $0.45 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. 分析管材因素对融雪效果的影响, 研究在恒流体温度条件下进行, 管材对流体加热道路融雪系统融雪效果的影响如图 2、3 所示. 图 2、3 计算结果表明, 采用恒流体温度控制模式进行流体加热道路融雪系统运行时, 管材对融雪效果存在显著的影响—随着埋管导热系数的增加, 融雪效果逐渐改善. 因此, 在恒流体温度运行条件下, 为保证良好的融雪效果, 应选用导热系数较大的管材作为路面埋管.

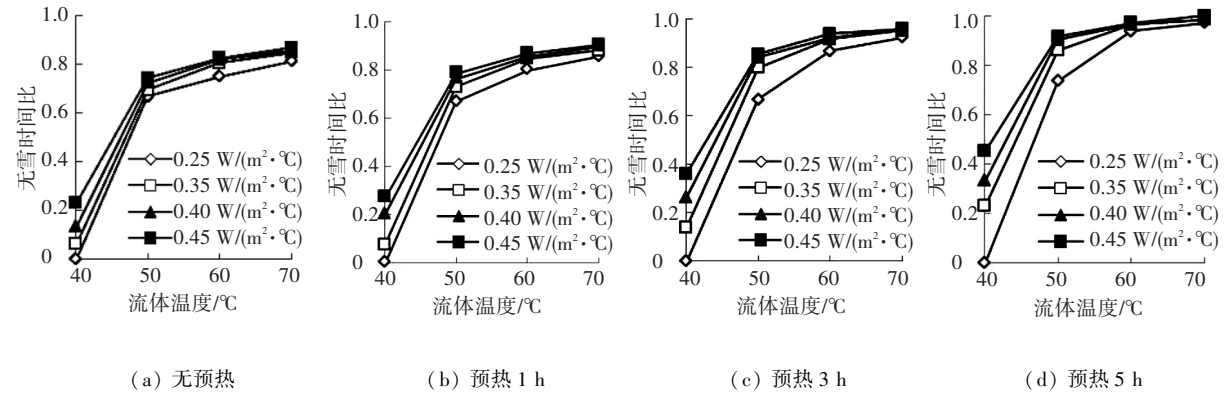


图 2 管材对融雪效果的影响 (哈尔滨)

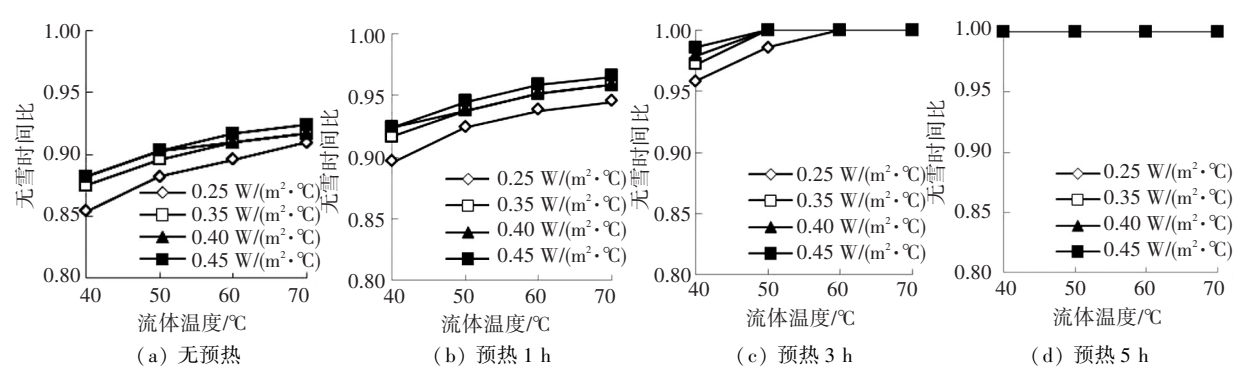


图 3 管材对融雪效果的影响(北京)

3.2.2 降雪速率对流体加热道路融雪系统融雪效果的影响

与系统预热时间、管材在流体加热道路融雪系统的运行中显著影响初始时刻道路结构温度分布及热量传递过程的作用原理不同,降雪速率通过对路表能量需求的改变而影响流体加热道路融

雪系统的融雪效果.

本文依据目前国际上对于降雪强度的分类标准^[21],分别选择 0.1、0.2、0.4、0.8 mm/h 作为小雪、中雪、大雪、暴雪的代表性等等效降雪速率,分析降雪速率对流体加热道路融雪效果的影响,见图 4、5.

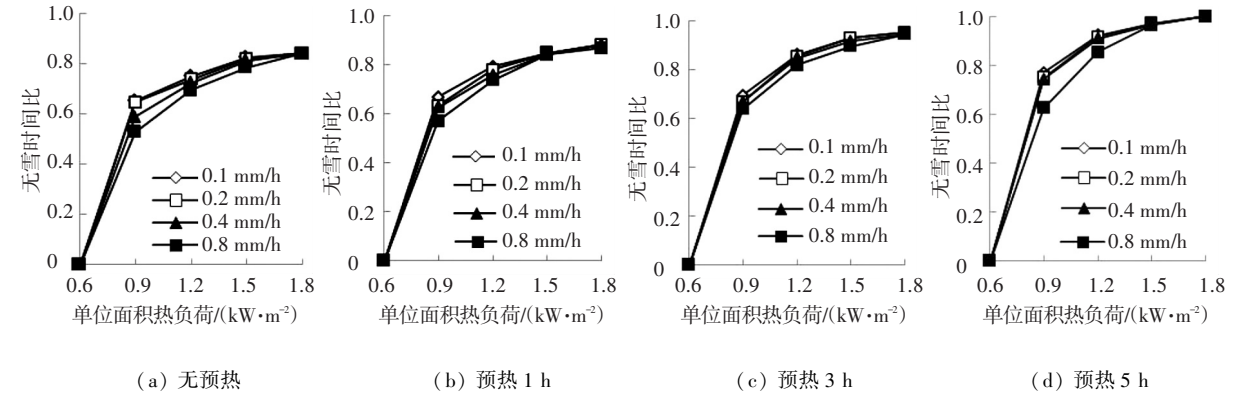


图 4 降雪速率对融雪效果的影响(哈尔滨)

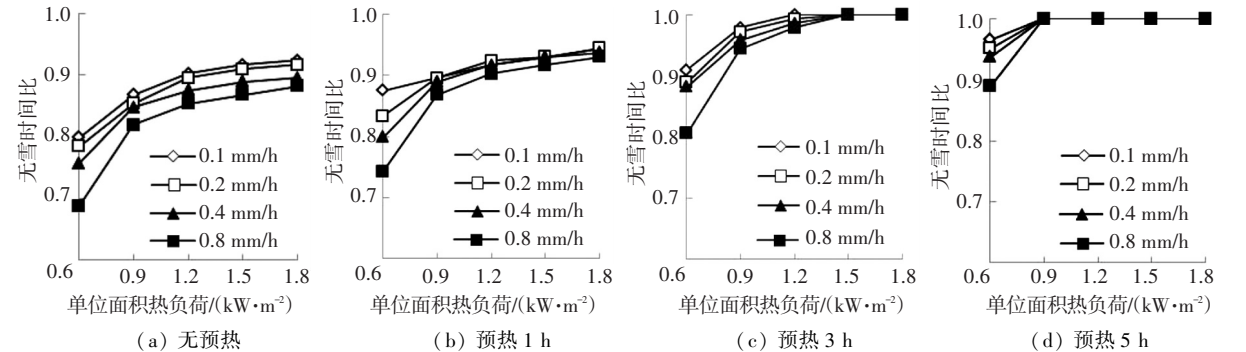


图 5 降雪速率对融雪效果的影响(北京)

由图 4、5 可见,随着降雪速率的增大,单位面积所需的融雪热负荷逐渐增加,以北京地区为例,降雪速率为 0.1 mm/h,在 0.9 kW/m²的输入热负荷且无预热时融雪效果可达到 86.8%;而降雪速率为 0.8 mm/h 时达到相同融雪效果则需要 1.5 kW/m²的热量. 另一方面,在确定融雪热负荷条件下,随着降雪速率的增大,融雪效果逐渐变差. 北京地区融雪系统单位面积输入热负荷为 0.6 W/m²且无预热时,降雪速率为 0.8 mm/h 时

的融雪效果为 68.8%,而降雪速率为 0.1 mm/h 时的融雪效果却可达到 80.0%. 此外,图 4、5 显示,输入热负荷较小时降雪速率对融雪效果的影响较大,随着输入热负荷的增加,由于降雪速率造成的融雪效果差异逐渐减弱.

3.2.3 道路材料对流体加热道路融雪系统融雪效果的影响

道路材料作为融雪道路热量传递的主要载体,其热物理性质与融雪效果密切相关,研究选用

目前我国常用的两种面层材料与 3 种基层材料作为研究对象,热物理参数列于表 2 中,分别开展面

层材料与基层材料对流体加热道路融雪系统融雪效果的影响研究.

表 2 道路材料热物理参数

层位	材料	状态	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	体积热容量/ ($10^6 \text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	导温系数/ ($10^{-7} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
面层	沥青混凝土	干燥	1.0	2.3	4.4
		饱和	1.4	2.6	5.3
	水泥混凝土	干燥	1.4	1.7	8.5
		饱和	2.2	2.4	9.0
基层	柔性基层	干燥	1.0	2.3	4.4
		饱和	1.4	2.6	5.3
	二灰土	干燥	1.1	1.7	6.0
		饱和	1.4	2.0	7.0
	水稳碎石	干燥	1.2	1.5	7.8
		饱和	1.5	1.8	8.3

图 6、7 面层材料对流体加热道路融雪系统融雪效果影响的研究显示,无论系统是否预热,面层材料对于流体加热道路融雪系统融雪效果均会产生显著的影响—相同融雪条件下,水泥混凝土路面的融雪效果显著优于沥青混凝土的融雪效果。

路面材料引起的融雪效果差异,归根结底在于材料热物理性质的差异,由于水泥混凝土的导热系数、导温系数较沥青混凝土高,而体积热容量较沥青混凝土低,由此造成水泥混凝土材料热量

传递能力、加热过程中温度趋于均匀一致的能力均优于沥青混凝土;而较低的体积热容,则使水泥混凝土路面具有较快的升温速率,因此,在相同融雪条件下,水泥混凝土路面具有较好的融雪性能。以哈尔滨地区为例,输入热负荷 0.9 kW/m^2 是且无预热时,水泥混凝土的融雪效果为 72.9% ,而此时沥青混凝土的融雪效果仅为 58.8% ,两者相差 14.1% ;当预热 5 h 后,水泥混凝土路面的融雪效果可达到 88.5% ,而此时沥青混凝土路面的融雪效果为 75.0% ,二者的差距仍有 13.5% 。

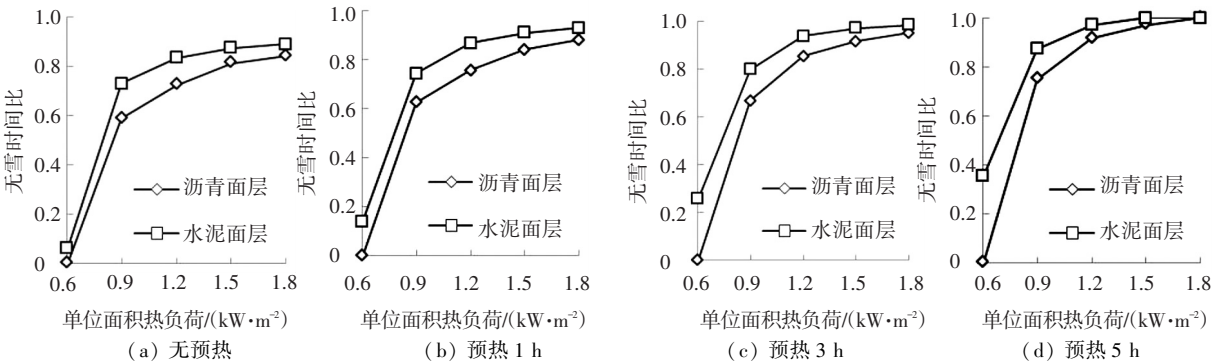


图 6 面层材料对融雪效果的影响(哈尔滨)

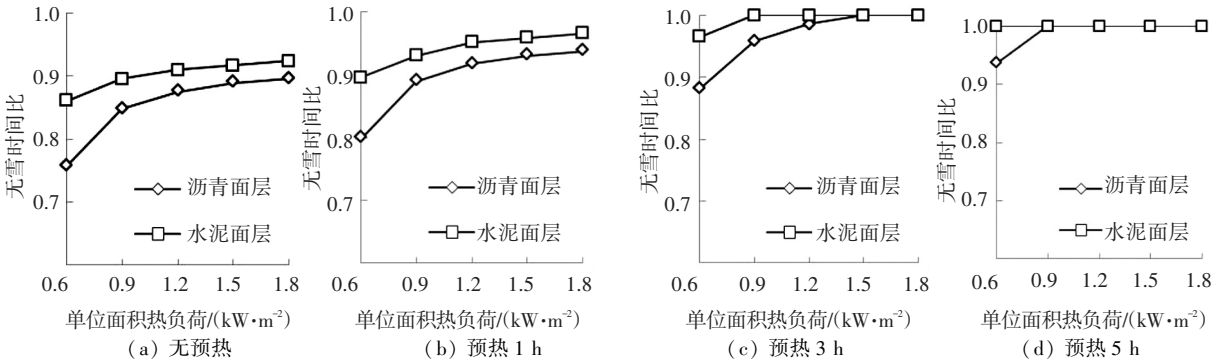


图 7 面层材料对融雪效果的影响(北京)

与此同时,由图 8、9 基层材料对融雪效果研究结果可知,当输入热负荷较小且预热时间较短时(0.6 kW/m^2),基层材料差异会造成融雪效果 $1\% \sim 2\%$ 的微弱差别,此后,随着预热时间的增长

以及单位面积热负荷的增大,不同基层材料的融雪效果基本一致,因此,在开展流体加热道路融雪系统融雪效果的研究时,可以忽略基层材料差异对于融雪效果的影响。

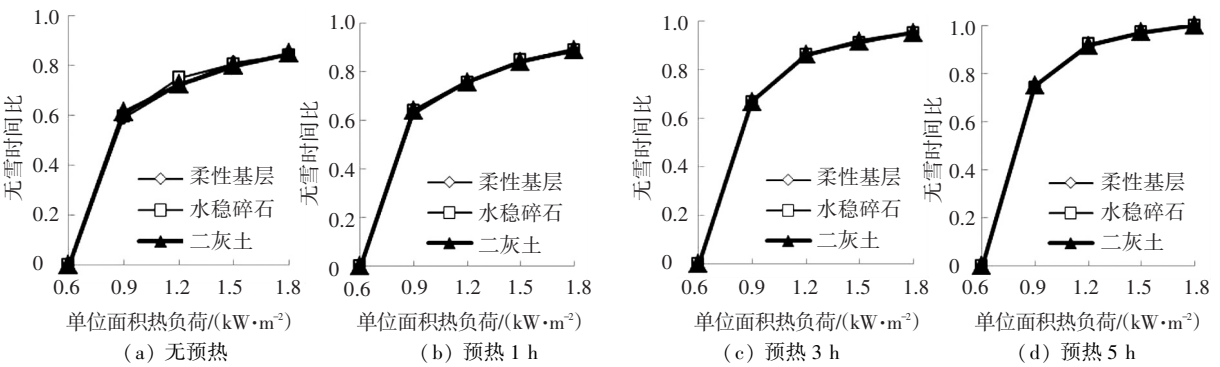


图 8 基层材料对融雪效果的影响(哈尔滨)

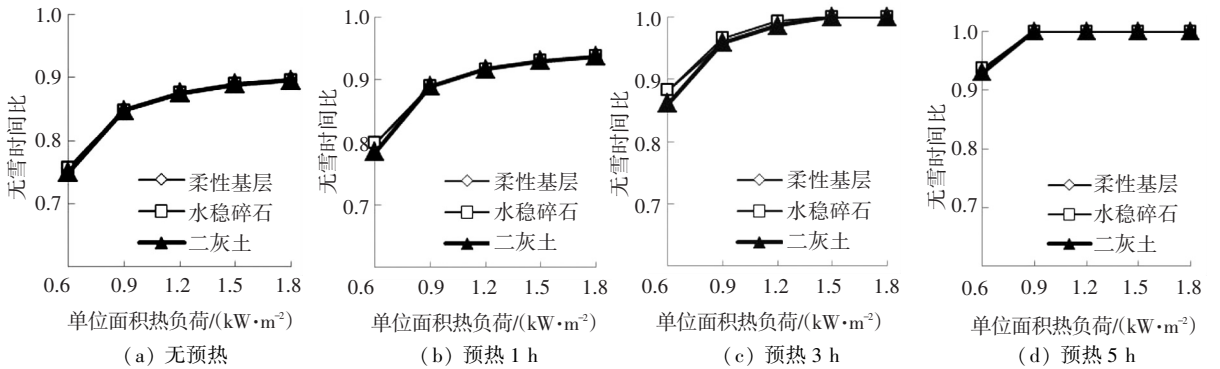


图 9 基层材料对融雪效果的影响(北京)

4 多地区流体加热道路融雪系统设计热负荷

我国国土横跨热带、亚热带及温带,而复杂的地形地貌更是加剧了降雪分布的多样性和不均匀性.第3节关于影响流体加热道路融雪系统运行效果的因素分析显示,在相同的系统参数设置下,不同地区道路融雪效果存在显著的差异,因此,合理选择适合本地区气候气象特点的单位面积融雪热负荷成为流体加热道路融雪系统设计的首要问题.本部分基于3.1节基准参数,依据表1我国不

同降雪分区代表性城市极限降雪条件,分别计算我国不同降雪分区代表性城市的单位面积设计热负荷,计算结果见表3.

表3显示,在无预热情况下,若流体加热道路融雪系统的融雪效果达到100%,则需要超过2000W/m²的热负荷;随着预热时间的增加,达到相同融雪效果所需的热负荷逐渐减少,预热3h以上,除极端寒冷的地区,道路融雪效果均可达到100%,上述研究再次表明,流体加热道路融雪系统具有良好的环境适应性.

表 3 我国不同地区流体加热型道路融雪系统单位面积设计热负荷

降雪地区	代表城市	融雪率/%	不同预热时间的设计热负荷/(W·m ⁻²)			
			无预热	1 h	3 h	5 h
东北部山区及丘陵区	哈尔滨	75	1 292	1 184	1 033	900
		100	>2 000	>2 000	>2 000	1 650
黄土高原及华北平原	北京	75	594	563	510	480
		100	>2 000	>2 000	1 064	640
秦岭-大巴山区	汉中	75	527	502	460	450
		100	>2 000	>2 000	613	600
江淮平原	合肥	75	581	544	483	452
		100	>2 000	>2 000	639	600
云贵高原	贵阳	75	559	527	470	450
		100	>2 000	>2 000	626	600
内蒙古高原	锡林浩特	75	1 362	1 243	1 056	1 013
		100	>2 000	>2 000	1 882	1 636
阿勒泰山区	阿勒泰	75	1 255	1 110	1 029	895
		100	>2 000	>2 000	>2 000	1 613
准噶尔盆地	乌鲁木齐	75	1 040	938	785	718
		100	>2 000	>2 000	>2 000	1 300
天山山区	阿拉尔	75	720	600	549	506
		100	>2 000	>2 000	1 450	943
伊犁谷地	伊宁	75	812	726	568	554
		100	>2 000	>2 000	1 383	738

5 结 论

1) 基于 1980—2010 年度的气象数据分析了 10 个代表性城市的降雪分布特征, 在此基础上, 提出了具有 95% 可靠度的代表性城市极限降雪条件. 预热时间、单位面积输入热负荷、埋设管材、道路材料显著影响降雪起始时刻道路结构温度场、单位面积输入能量及热量传递能力, 因此, 可通过调整系统运行参数达到优化融雪效果的目的.

2) 不同的地点, 其降雪具有显著差异, 达到相同融雪效果所需热负荷不同. 据此, 应根据设计城市的气候条件、道路等级、通行能力等因素, 进行流体加热道路融雪系统的设计.

3) 针对我国不同降雪分区代表性城市极限降雪条件, 开展了多城市流体加热道路融雪系统设计热负荷研究, 建立了多城市流体加热道路融雪系统设计热负荷.

参考文献

[1] CHAPMAN W P, KATUNICH S. Heat requirements of snow melting [J]. Heating, Piping and Air Conditioning, 1956, 2: 149-153.

[2] ASHRAE. Handbook of HVAC applications 2003 [M]. New York: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, 2003.

[3] LIU X. Development and experimental validation of simulation of hydronic snow melting systems for bridges [D]. Stillwater: Oklahoma State University, 2005.

[4] 胡文举. 基于土壤源热泵桥面融雪系统的基础研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

[5] 王庆艳. 太阳能-土壤蓄热融雪系统路基得热和融雪机理研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.

[6] 黄勇. 路面融雪化冰及太阳辐射吸热研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2010.

[7] 王华军. 流体加热道路融雪传热传质特性研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007.

[8] PHILIP J R, VRIES D. Moisture movement in porous materials under temperature gradients [J]. Transactions of the American Geophysical Union, 1957, 38: 222-

232.

[9] BROOKS R H, COREY A T. Hydrological properties of porous media [M]. Fort Collins: Colorado State University, 1964.

[10] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivities of unsaturated porous medium [J]. Water Resour Research, 1976, 12: 513-522.

[11] RAUDKIVI A J, VAN UU N. Soil moisture movement by temperature gradient [J]. Journal of the Grotechnical Engineering Division, 1976, 12: 1225-1244.

[12] TAYLOR G S, LUTHIN J N. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15: 548-555.

[13] NAKANO Y, TICE A R. Soil-water diffusivity of unsaturated soils at sub-zero temperatures [C]// Proceedings of 4th International Conference on Permafrost. Fairbanks: International Permafrost Association, 1982: 889-893.

[14] DE VRIES D A. Physics of the plant environment [M]. North-Holland: WR Van Wijk, 1963.

[15] LU S, REN T, GONG Y. 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.

[16] XU Huining, TAN Yiqiu. Development and testing of a heat and mass coupled snow melting model for hydronic heated pavement [J]. Transportation Research Record, 2012, 2282: 14-21.

[17] HU R, MA H, WEI W. Snow hazard regionalization in China [J]. Chinese Geographical Science, 1992, 3: 197-204.

[18] US Department of Commerce. NOAA satellite and information service [EB/OL]. [2010-09-23]. <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/mpp/freedata.html#FREE>.

[19] US Department of Energy. National solar radiation data base [EB/OL]. [2010-09-23]. http://rredc.nrel.gov/solar/old_data/nsrdb/1991-2005/tmy3/.

[20] 杨书平. 太阳能供热采暖技术新突破 [J]. 建设科技, 2010, 14: 82-83.

[21] 曲香朴. 气象学与天气学 [M]. 北京: 水利水电出版社, 1991.

(编辑 魏希柱)