

# 循环管道加热桥面融雪效能数值模拟

陈文举<sup>1,2</sup>, 陈俐企<sup>1,2</sup>, 包春波<sup>3</sup>, 朱启银<sup>4</sup>, 惠冰<sup>5</sup>, 庄培芝<sup>1,2\*</sup>

(1.山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南 250002; 2.山东大学交通基础设施智能养护技术与功能材料研究中心, 山东 济南 250002; 3.济南市交通运输事业发展中心, 山东 济南 250013; 4.中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 5.山东省交通科学研究院, 山东 济南 250102)

**摘要:**为了优化桥面流体加热系统的结构布设及运行参数设计,进一步提高融雪效能,基于COMSOL Multiphysics多物理场耦合仿真平台,以相变过程表征桥面雪层融化成水的过程,构建循环管道加热桥面融雪效能分析的三维计算模型。通过文献试验数据对新建数值模型的准确性进行验证,采用该模型模拟分析管道进口流体温度、地热管埋深、管间距、管直径、积雪层厚度以及流体温度沿程损失等因素对桥面无雪率、融雪速率和温度场分布的影响规律。模拟结果表明积雪层厚度超过0.04 m会显著降低热管融雪系统的融雪速率,管道进口流体温度的提升使得融雪速率的增长率逐渐减小,管内流体与桥面结构在热量传递过程中温差不断减小,表现出一种非线性的温度衰减效应。研究结果可为相关桥面流体加热系统的效能分析和优化设计提供数据支撑和技术参考。

**关键词:**循环管道桥面加热系统;融雪模型;数值模拟;融雪效能;地热能

**中图分类号:**U447 **文献标志码:**A

**引用格式:**陈文举,陈俐企,包春波,等.循环管道加热桥面融雪效能数值模拟[J].山东大学学报(工学版),2024,54(6):100-110.

CHEN Wenju, CHEN Liqi, BAO Chunbo, et al. Numerical simulation snow melting efficiency of circulating pipeline heating bridge decks [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(6):100-110.

## Numerical simulation snow melting efficiency of circulating pipeline heating bridge decks

CHEN Wenju<sup>1,2</sup>, CHEN Liqi<sup>1,2</sup>, BAO Chunbo<sup>3</sup>, ZHU Qiyin<sup>4</sup>, HUI Bing<sup>5</sup>, ZHUANG Peizhi<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China; 2. Research Center of Intelligent Technology and Functional Materials for Maintenance of Transportation Infrastructure, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China; 3. Jinan Transportation Development Center, Jinan 250013, Shandong, China; 4. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 5. Shandong Transportation Research Institute, Jinan 250102, Shandong, China)

**Abstract:** In order to optimal design of the structural layout and operating parameters of the bridge deck fluid heating system, and further improve the snow melting efficiency, based on COMSOL Multiphysics multi-physics field coupling simulation platform, a three-dimensional computational model was constructed to analyze the snow melting efficiency of circulating pipeline-heated bridge decks by characterizing the process of melting the snow layer of bridge decks into water with the process of phase change. The accuracy of the new numerical model was verified by the experimental data in the literature, and the model was used to simulate and analysis the influence of the pipe inlet fluid temperature, geothermal pipe burial depth, pipe spacing, pipe diameter, snow layer thickness and fluid temperature along the loss on the bridge deck snow-free rate, snow melting rate and temperature field distribution. The simulation results showed that the thickness of the snow layer over 0.04 m would significantly reduce the snow melting rate of the heat pipe melting system, and the increase of the temperature of the pipe inlet fluid made the growth rate of the snow melting rate decrease gradually, and the temperature difference between the fluid inside the pipe and the bridge deck structure in the process of heat transfer decreases constantly, which exhibited a nonlinear temperature decay effect. The results of the study could provide data

收稿日期:2023-08-31

第一作者简介:陈文举(1997—),男,河南周口人,硕士研究生,主要研究方向为桥面融雪模拟。E-mail:1176133152@qq.com

\*通信作者简介:庄培芝(1988—),男,山东青岛人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为岩土力学及岩土工程。

E-mail: zhuangpeizhi@sdu.edu.cn

support and technical reference for the efficiency analysis and optimal design of the related bridge deck fluid heating system.

**Keywords:** circulation pipe bridge heating system; snow-melting and de-icing model; numerical simulation; snow-melting efficiency; geothermal energy

## 0 引言

据统计,我国70%以上的道路冬季会遭受冰雪天气的影响<sup>[1]</sup>。当道路表面覆盖冰雪时,车辆轮胎与路面的附着系数显著降低,导致车辆出现打滑、偏移、制动距离延长等问题;同时路面积雪层遮盖了道路标志标线,影响行车视线,严重危害驾驶人的人身安全<sup>[2]</sup>。据不完全统计,30%左右的交通事故与道路冰雪有关<sup>[3]</sup>。另外,道路冰雪易对车辆和道路设施造成严重破坏。因此,高效解决道路表面积雪结冰问题一直备受关注<sup>[4]</sup>。

目前对路面积雪结冰主要采用被动式清除方法,例如机械法和化学融雪法。机械法除冰雪过程中需要占用行车道或封闭交通,影响道路正常运行;当气温较低或积雪厚度较大时,存在除雪效率低、清除不彻底等问题,且机械设备消耗大量时间和人力<sup>[5]</sup>。常规除雪剂则容易对水泥混凝土路面或桥梁结构的耐久性能产生不利影响(如混凝土脱落、钢筋腐蚀等),而且掺杂融雪剂的冰雪融水排入沿线水体和土壤后对环境也有一定污染,破坏生态环境<sup>[6]</sup>。随着人们对路面行驶状况和道路结构耐久性防护的日益重视,国内外涌现了诸多主动式路面融雪化冰新技术,如自应力弹性铺装路面、低冰点路面和能量转化式路面<sup>[7]</sup>。相关新技术多处于研究和应用的初期阶段,急待更多深入、系统的研究,文献[2]对相关技术特点进行了较为详细的梳理分析。相关研究显示循环流体加热技术在绿色融雪化冰方面具有良好的应用前景<sup>[8]</sup>。

自20世纪40年代起,循环流体加热技术在国内外开展了一定数量的示范应用<sup>[9]</sup>。然而,积雪属于典型的多孔介质,其物理性质受微观结构特征和气候参数影响显著<sup>[10]</sup>,并且融化过程中的道路条件和天气条件是多变的,因此流体加热系统的融雪化冰性能受诸多参数的影响,如浅层地热能提取并输入到路面结构的温度、埋管布置参数(管间距、埋设深度)和环境温度等<sup>[11-14]</sup>。国内外学者通过开发循环流体加热道路模型,对优化融雪性能展开了大量研究。文献[15]首次建立了循环管道加热融雪系统的稳态模型,通过研究分析表明,能量输出应基于热量需求的频率分布;文献[16]通过研究评估了

计算嵌入式融雪系统设计热量需求的方法,尤其是在寒冷气候条件下运行的系统,通过2个融雪试验案例,表明使用隔热材料实际上可以消除地面热量损失;文献[17]开发了一种二维管道流体加热板的二维稳态模型,揭示了流体管道离散布局对于表面温度变化的影响。然而,稳态分析模型忽略了瞬态效应对融雪系统运行过程中的重要影响;文献[18]通过跟踪道路表面的冰、雪、水热量和质量的变化情况,描述了瞬态降雪过程,并比较了利用瞬态模型和稳态模型计算融雪过程所需的最小热通量;文献[19]通过研究融雪过程中雪层的毛细管效应和热性能变化,得出一种简化的数值计算方法确定其对管道流体加热路面系统传热的影响,模拟结果显示在实际的融雪过程中应尽量避免结冰现象的出现,以保证融雪系统的效能;文献[20]针对管道流体融雪系统开发了新的融雪模型,建立的非稳态模型讨论了融雪路面二维温度场的分布以及融雪雪水下渗对道路结构材料热物理参数的影响;文献[21]研究开发了一种附着式管道加热系统,用于现有桥梁的地热融雪,加热管道附着于桥梁底部并封装于隔热材料土工泡沫中,结果表明附着式管道加热桥面可以将约60%的供热量有效传递到桥面底部。虽然管道流体融雪系统已在冰雪和寒冷地区应用了几十年,现有模型对于质量和热量的传递在二维雪融化过程研究较多,但二维融雪模型存在诸多缺陷,例如无法实现管内流体沿程温度损失过程模拟。目前利用三维精细化融雪模型研究嵌入式管道参数和空间布局以增强传热效果的研究很少,很大程度上限制了流体加热系统的三维空间结构布设及运行参数的优化设计。另外,传统管道流体融雪系统大多考虑快速融雪,进而研究高流体温度下的融雪效果和道面传热传质过程,输入的流体温度较高,较少开展低温流体对融雪性能的影响规律,尤其是随着新清洁能源的开发和使用,如浅层地热能,将会在更多的场景中得到应用,包括在关键桥梁构筑物上铺设流体加热管道加热。

利用地热能对桥面加热,有清洁、无污染和节能的优点,是当前桥面主动式融雪化冰的一个热点方向。本研究采用COMSOL Multiphysics有限元方法对基于浅层地热能开发的桥面循环流体加热系统在SMA-13沥青混凝土+C50水泥混凝土典型

桥面结构中的融雪性能开展模拟研究,建立流体加热桥面三维瞬态融雪模型。针对山东济南及周边地区的温度及地热环境等典型地域条件,研究了不同管道布置参数、不同输入温度以及不同雪层厚度等关键因素对桥面融雪效能(无雪率和融雪速率等)和温度场分布的影响程度,从而为相关桥面流体加热系统的效能分析和优化设计提供数据支撑和技术参考。

## 1 循环热管桥面融雪效能分析数值模型

基于浅层地热能源的桥面热管加热技术主要是通过通过在路面埋置地热管道,利用地源热泵和换热器等将浅层地热能从地下提取,后将热量品级提升,再利用循环系统将温度较高的流体通过泵机流入到路面的地热管道内,达到融化冰雪的目的。桥面融雪除冰系统如图1所示。

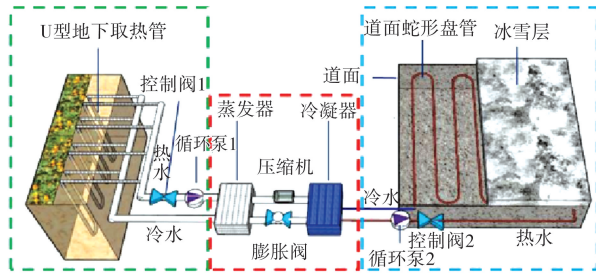


图1 桥面融雪除冰系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the bridge deck snow melting and de-icing system

结合流体桥面融雪系统的典型结构布设与环境运行情况,采用 COMSOL Multiphysics 对其进行三维建模。

### 1.1 模型假设与控制方程

循环流体在管道流动的过程中会向外耗散热量,取完整的一个循环过程为研究对象,模拟计算过程采用如下主要假设。

(1) 干雪、桥面材料假定为具有各向同性、均匀的热传导性能;热管与桥面材料热传递过程没有能量损失;桥面结构各层间紧密接触,不影响传热。

(2) 路表设定为对流边界条件,且与外界发生热交换(热辐射、热对流、大气辐射等);同时为简化计算,未考虑融化过程蒸发冷凝对于系统能量的影响,并假定桥梁表面雪层融化后的水仍在其表面附着。

实际上,循环流体加热桥梁内流体与桥梁结构之间的换热过程依次为流体到管道的传热、管道到混凝土的传热;外部传热主要包括雪层融化的耗热

量、道路表面与外界辐射对流等的耗热量。相关控制方程总结如下。

非等温管道内流体动量方程为:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla_t P \cdot e_t - \frac{1}{2} f_D \frac{\rho}{d_h} |u| u + F \cdot e_t, \quad (1)$$

式中: $\rho$  为流体的表观密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $u$  为管内流体平均速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $P$  为流体压力,  $\text{Pa}$ ;  $e_t$  为流体的切向矢量;  $f_D$  为达西摩擦系数;  $d_h$  为水力当量直径,  $\text{m}$ ;  $F$  为体积力,  $\text{N}/\text{m}^3$ 。

管内流体质量方程为:

$$\frac{\partial A\rho}{\partial t} + \nabla_t \cdot (A\rho u e_t) = 0, \quad (2)$$

式中: $A$  为地理管内截面面积,  $\text{m}^2$ 。

管内流体能量方程为:

$$\rho A C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho A C_p u e_t \cdot \nabla_t T = \nabla_t (AK \nabla_t T) + \frac{1}{2} f_D \frac{\rho A}{d_h} |u| u^2 + Q_{\text{wall}}, \quad (3)$$

式中: $C_p$  为流体的定压比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T$  为温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $K$  为流体导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $Q_{\text{wall}}$  为管壁传递的热量,  $\text{W}/\text{m}$ 。

内部管道与混凝土结构传热问题采用 Fourier 定律描述,其传热方程为:

$$q = -k \nabla T, \quad (4)$$

$$\rho_l C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla q + Q, \quad (5)$$

式中: $q$  为热通量,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $\rho_l$  为混凝土的表观密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $C_p$  为混凝土的定压比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $k$  为混凝土的有效导热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $Q$  为埋管总换热量,  $\text{W}$ 。

融雪过程依据质量守恒定理及热量守恒定理,干雪/冰上表面的热量守恒方程为:

$$q_{\text{cs}} = q_c + q_r + q_s, \quad (6)$$

式中: $q_{\text{cs}}$  为由半融雪层传向干雪层的热流密度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $q_s$  为降雪释放的热量,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $q_r$  为长波辐射热流密度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $q_c$  为对流换热热流密度,  $\text{W}/\text{m}^2$ 。

本研究将干雪层视为各向同性介质,可假设温度梯度沿着深度方向为常数,计算公式为:

$$q_{\text{cs}} = \frac{K_s}{H_s} (T_{\text{sb}} - T_{\text{st}}), \quad (7)$$

式中: $T_{\text{sb}}$  为干雪底面温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{st}}$  为干雪顶面温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $H_s$  为干雪层厚度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $K_s$  为干雪的导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

路面积雪融化吸收的热量方程为:

$$q_m = m_m \cdot h_f, \quad (8)$$

式中: $q_m$  为融化潜热,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $h_f$  为水的融化潜热,

$J/Kg; m_m$  为等效融雪速率,  $kg/(s \cdot m^2)$ 。

1.2 数值模型与网格划分

为模拟分析桥面循环热流体系统融雪过程传热及相变规律,结合典型结构布设与环境运行情况,采用 COMSOL Multiphysics 对其进行三维建模,如图 2 所示,模型主要由三部分组成:管内传热介质、U 型管道、混凝土结构层。

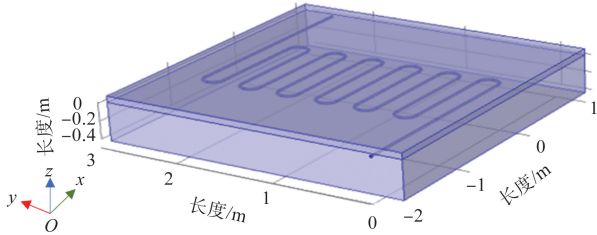


图 2 模型结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the model structure

管内流体在流动过程中会受到黏性作用,导致流动速度低于初始输入流体速度,同时位于路面结构内部,热交换作用较复杂。为了保证计算准确性,管内流体到外部路面层结构采取由密到疏的网格划分原则。整体采用用户控制的自定义网格划分,中心流体预定义为极细化网格,桥面冰雪层采用自由四面体较细化网格,满足越靠近流体管道的部位,网格密度越大,模型网格划分如图 3 所示。

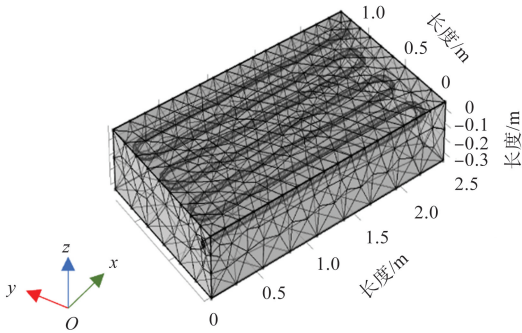


图 3 模型网格划分

Fig.3 Model meshing

1.3 边界条件与参数设置

雪层融化是从固体融化变成液体即发生相变的过程,要向固体施加能量,这些能量并不会引起温度上升,而是改变了材料的分子结构,在数值模型构建中各参数变化如表 1 所示(数据来源于最新的 ASHRAE 气候数据库 2017<sup>[22]</sup>)。

表 1 材料属性相变前后变化

Table 1 Changes in material properties before and after phase change

材料	导热系数/ [W·(m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )]	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	恒压热容/ [J·(kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )]	比热率
冰(相)	2.3	917	2 050	1.0
水(相)	0.6	1 000	4 200	1.1

模型边界条件设定:假定为提升融雪效果,桥面结构底部和侧面设置隔热层,因此模型中桥面底部和侧面边界均设置为绝热状态<sup>[23]</sup>。管道入口温度设置为定值,根据输入温度而定,桥面结构初始温度设置为 0 °C,出口设置为热流出。

由于桥面暴露于大气环境中,因此会形成辐射传热和对流传热,这里采用对流传热通量的方式描述,对流量方程为:

$$q_0 = h(T_{ext} - T_2), \tag{9}$$

式中: $q_0$  为对流换热热流密度,  $W/m^2$ ;  $h$  为对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $T_2$  为雪层表面温度,  $^\circ C$ ;  $T_{ext}$  为环境温度,  $^\circ C$ 。

1.4 模型验证

首先,本节采用文献[24]试验数据对上述数值模型进行验证分析。文献[24]开展了流体加热道路融雪试验,其中路面类型为半刚性基层沥青路面,尺寸为 2.00 m×1.25 m,采用 PERT 管按照蛇形排布方式布设,质量分数 35%的乙二醇水溶液作为循环介质,机组相关参数如表 2。采用相同的试验环境和结构参数进行数值建模和桥面融雪效能模拟计算分析。

表 2 流体加热道路融雪试验系统机组参数

Table 2 Design parameters for fluid-heated road snow-melting test system units

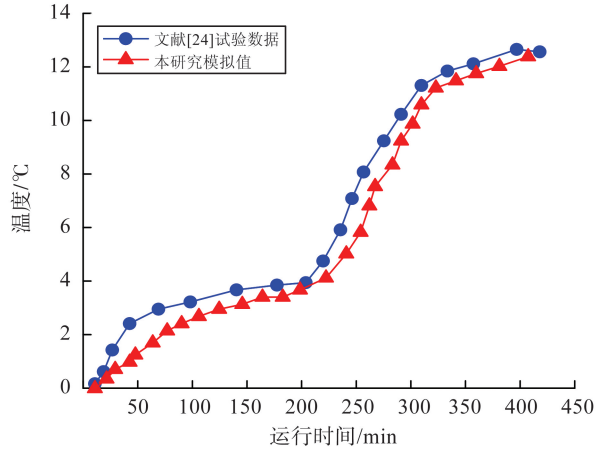
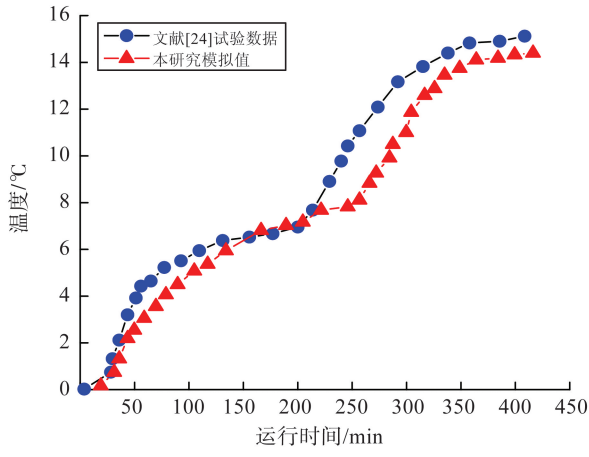
埋管数量	埋管深度/m	埋管直径	热泵机组有效频率/%	循环介质	热泵机组设计最高出水温度/ $^\circ C$
3	55~60	DN32	50~100	35%乙二醇水溶液	55

本研究模拟计算结果与文献[24]的试验结果对比如图 4、5 所示。与文献[24]相同,提取加热 280 min 后路表温度的变化情况以及距离管道相同距离不同深度结构处的温度分布状况。对比结果显示,模型预测结果与试验实测数据的差异比较小,但本研究模拟值总体呈现偏小的趋

势,这是由于模型中冰雪融化之后仍留存在道路表面,这部分雪水仍旧会吸收热量但是其温度在雪层完全融化之前不会升高,在雪层完全融化之后没有及时排出,会随着道路结构的供热而温度持续上升,该部分温度的上升会消耗部分热量,导致路面结构的温度上升低于试验温度。但整

体可以看出,本研究模拟结果与文献试验结果具有较好的吻合度,进而证明本研究数值模拟方法

对于管道流体桥面融雪效能计算的准确性和可靠性。

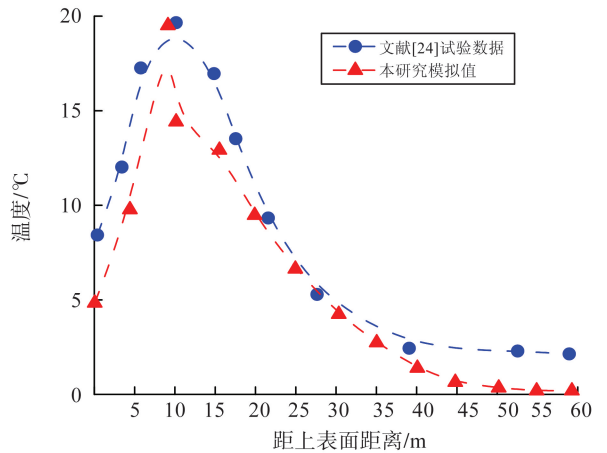
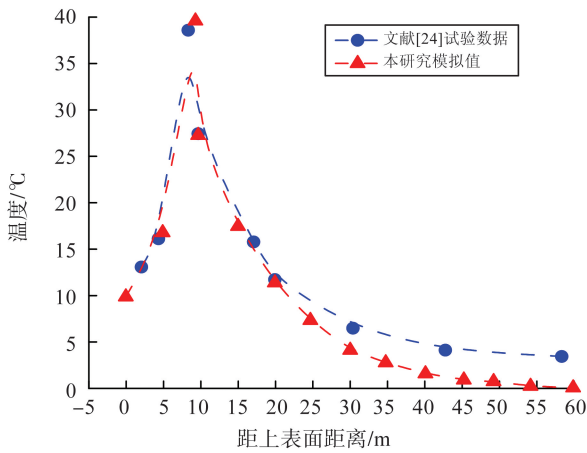


(a) 埋管正上方温度

(b) 1/2间距温度

图4 距离路表2 cm处温度对比

Fig.4 Temperature comparison at 2 cm from the road surface



(a) 深度正上(下)方温度场

(b) 1/2管距温度场

图5 运行时间280 min 温度场分布对比

Fig.5 Comparison of temperature field distribution for 280 min running time

## 2 不同条件下的融雪计算结果及分析

采用上述验证的数值方法对热管桥面融雪效能关键影响因素进行模拟分析。

### 2.1 数值模型与工况设置

根据最新的ASHRAE(2017)气候数据库的数据定义环境变量。选取的数据年份综合往年数据选择不定期,日期为1月1日,采集数据持续时间总计为8 760 h 温度数据,济南地区气象年环境温度如图6所示。

如图2所示,桥面结构内部设置有U型热管,研究主体为一个循环回路下的道路传热及表面融雪状况。

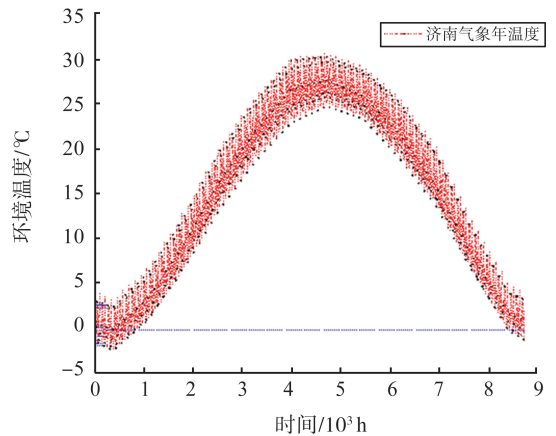


图6 济南气象年温度

Fig.6 Meteorological annual temperature of Jinan

具体的相关参数如下:管道入口体积流速为10 L/min;选用质量分数为35%的乙二醇水溶液

作为流动介质,其密度为  $1\ 050\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,比热容为  $3\ 550\ \text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,导热系数为  $0.4\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;混凝土材料的热扩散系数为  $5.6\times 10^{-6}\ \text{m}^2/\text{s}$ ,其密度为  $2\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,导热系数取  $1.05\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,恒压热容为  $1\ 000\ \text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。其中,文献[25-27]显示,沥青材料的热物性参数受温度影响会发生变化。

沥青材料热膨胀系数的关系式为:

$$\alpha = 35.25e^{-\left(\frac{T+5.213}{35.11}\right)} \times 10^{-6}, R = 0.923\ 1, \quad (10)$$

表3 物理模型几何参数

Table 3 Geometric parameters of the physical model

参数	管道埋置深度/mm	管道布置间距/mm	积雪层厚度/cm	进口流体温度/ $^{\circ}\text{C}$	流体管道直径/mm	流体管壁厚度/mm
标准工况	100	200	3	10	15	5
对比工况	80, 90, 100, 110, 120	150, 200, 250, 300	3, 4, 5, 6, 7	8, 10, 12, 14, 16	10, 15, 20	5

### 2.2 多因素参数对融雪效果的影响

量化表征桥面冰雪融化效果采用无雪率参数  $V_r$ ,定义公式为:

$$V_r = \frac{V_f}{V_t} = 1 - \frac{V_s}{V_t}, \quad (12)$$

式中: $V_f$ 为桥面已融化冰雪的体积, $\text{m}^3$ ; $V_t$ 为整个道路结构初始的雪层体积, $\text{m}^3$ ; $V_s$ 为桥面未融化冰雪的体积, $\text{m}^3$ 。

#### 2.2.1 管道布置间距对融雪效果的影响

不同管道间距下桥面无雪率随时间的变化规律如图7所示。随着加热时间的延长,不同管间距下的桥面无雪率不断上升;随着管间距的增大,冰雪的融化速率变小。例如当加热时间为70 min时,管间距0.15、0.20、0.25、0.30 m对应的无雪率分别为0.62、0.55、0.42、0.38;加热时间为100 min时,管间距0.15、0.20、0.25、0.30 m对应的无雪率分别为0.92、0.78、0.55、0.48。当管间距增加到0.20 m之后,无雪率的增速明显减慢。主要是因为随着管道间距增大,管道热流体能够辐射的有效融雪区域快速减小,融雪效果也随之下降。

管道正上方路表温度随时间的变化如图8所示。随着加热时间的进行,不同管道间距下的路表温度呈现出不断增大的趋势;相同加热时间下,路表温度随着管道间距的增大而下降;此外,管道间距由0.15 m增大至0.20 m时对于路表温度的变化影响最为显著,而当管道间距大于0.20 m时变化幅度明显减小,这表明管道间距的增大对于路面温度场的影响程度不断降低。

式中  $R$  为相关系数。

沥青材料的导热系数的关系式为:

$$\lambda = 1.032\ 1 - 0.008\ 5T, R = 0.950\ 1. \quad (11)$$

针对基于浅层地热能的桥面热管融雪系统特点,本研究采用控制变量法,模拟计算管道进口流体温度、地热管间距、管埋深、管直径、进口流体温度和积雪层厚度等关键因素(如表3所示)对整体融雪效能及桥面温度场的影响规律。其余材料及参数同上所述。

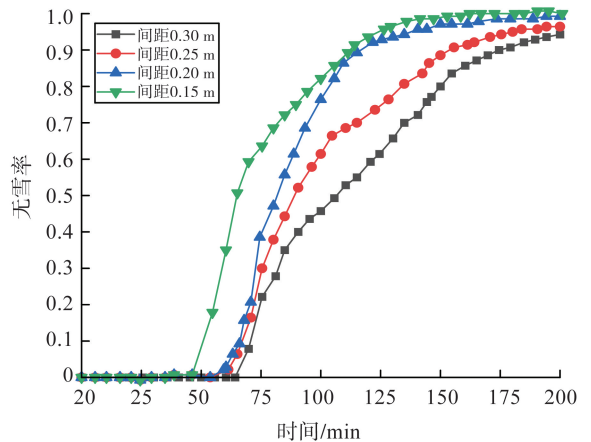


图7 不同间距对融雪效果的影响

Fig.7 Effect of different spacing on snow melting effect

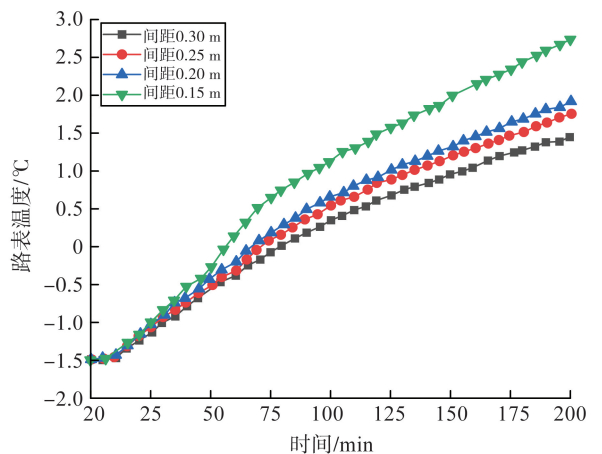


图8 不同间距下,管道正上方路表温度变化

Fig.8 Temperature variation of the road surface directly above the pipe at different pitches

管道布设长度的增加会导致热管融雪系统的初始投资和运营成本提高。基于此,综合平衡管道间距对路面温度场的影响和管道布设运营成本具

有重要意义,可用于指导管间距设置。例如,针对表3所示的标准工况,最优管道间距推荐约为0.20 m。

### 2.2.2 管道埋置深度对融雪效果的影响

不同管道埋深条件下路面融雪效果随时间的变化如图9所示。由图9可以看出:桥面冰雪的初始融合时间随着管道埋深的增加明显滞后,例如埋深0.08 m时在加热时间40 min之后开始出现初步融雪,积雪完全融化所需要的时间约为150 min;而管道埋深0.12 m时初步融雪的时间增大至80 min,且在对应的150 min时桥面无雪率仅为0.70,未能完全融化。

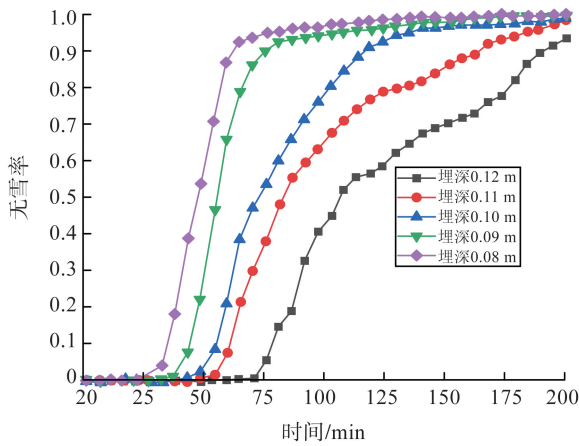


图9 埋置深度对融雪效果的影响

Fig.9 Effect of burial depth on snow melting effect

从融雪效能角度分析,管道埋深越小其融雪效率越高。但需要指出,随着管道埋深的变浅,管道对桥面结构承载能力的影响将显著增大,最优管道埋深的确定需要综合考虑融雪效率和桥面结构承载需求。文献[28]研究表明,管道埋深0.08 m可以延长桥面的使用寿命,并为融雪保持足够的热量供应,因此,推荐管道埋深为0.08 m。

### 2.2.3 雪层厚度对融雪效果的影响

不同雪层厚度时桥面无雪率随时间的变化如图10所示。桥面雪层的初始融化时间随着初始雪层厚度的增大而增加。雪层厚度为0.03 m时,雪层初融时间约为60 min;当雪层厚度达到0.06 m时,雪层初融出现的时间延长至95 min,初融时间的增长率达到58.3%。桥面达到无雪状态所需要的总时长随初始雪层厚度的增大而显著增加。当初始雪层厚度为0.03 m时,对于本研究模拟的标准工况,实现桥面全部融雪大约需要170 min;对于初始雪层厚度为0.07 m的工况,融雪时长超过200 min。雪层厚度超过0.04 m时,融雪速率出现明显降低,这是由于雪层是一个绝缘体,具有很强的隔热性能。雪层

越厚,能够吸收和储存更多的热量,使得热量无法快速传递到雪层顶部,同时表明降雪开始时,应尽快通过融雪系统清除积雪,以保证融雪效率<sup>[29]</sup>。

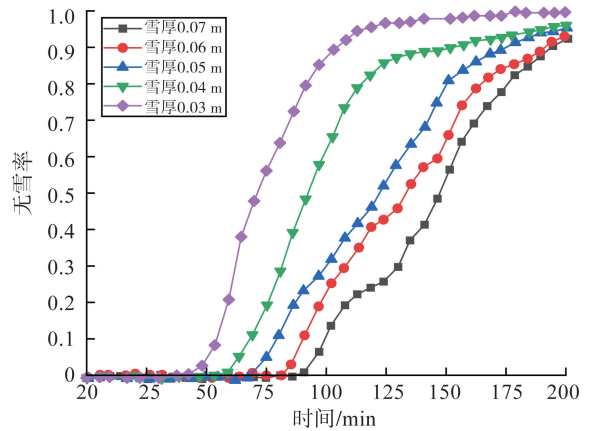


图10 雪层厚对融雪效果的影响

Fig.10 Effect of snow layer thickness on snow melting effect

在融雪系统设计阶段,若设计雪层厚度过小,计算融雪热负荷偏小,使得整体的换热功率过小,无法满足实际所需要的热量的设计要求;若是设计的雪层厚度过大,则计算热负荷增大,会造成不必要的材料及能源损失。需要根据不同地区的气候特点确定融雪层层厚并进行融雪系统的设计。

### 2.2.4 管道进口流体温度对融雪效果的影响

管道进口的输入温度很大程度上决定了整个系统融雪速率和融雪时间,在输入温度受限的情况下研究温度对融雪效果的影响程度。管道加热系统融雪效果随进口温度(管内流体初始温度)的变化如图11所示,不同进口流体温度情况下,桥面循环一个回路之后出口处管道内流体温度的变化如图12所示。整体上,随着管道进口处流体温度的提高,平缓融雪阶段缩短,达到无雪状态所需总时长缩短,管道加热系统的融雪效能随之提升,进出口流体温度差值也相应增大,进口温度分别为8、10、12、14、16 °C时,各个出口流体温度差分别为0.79、0.97、1.15、1.33、1.50 °C。

从上述数据可以看出,进口流体温度的变化对融雪效果有一定影响,即在浅层地热提供较低输入温度时(8~16 °C),随着进口流体温度的不断增大,融雪效果不断增强,融雪速率不断增加,但融雪速率的增长率逐渐减小,这是因为一开始桥梁结构初始温度较低,较小的温度提升导致较大的温度梯度变化,随着温度的不断上升,导致温度梯度的差值减小,系统传热的效率降低,路面融雪的效果也随之减弱,出现随着流体持续输入时间的增长融雪速率不断减小的趋势,如图13所示,即融雪状态由快

速融雪阶段过渡到缓慢融雪阶段。

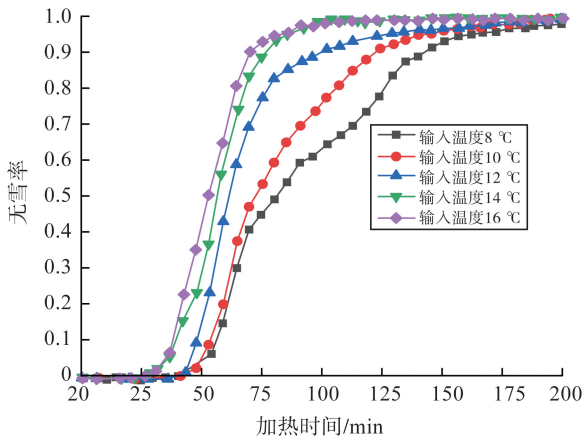


图 11 输入温度对融雪效果的影响

Fig.11 Effect of input temperature on snow melting effect

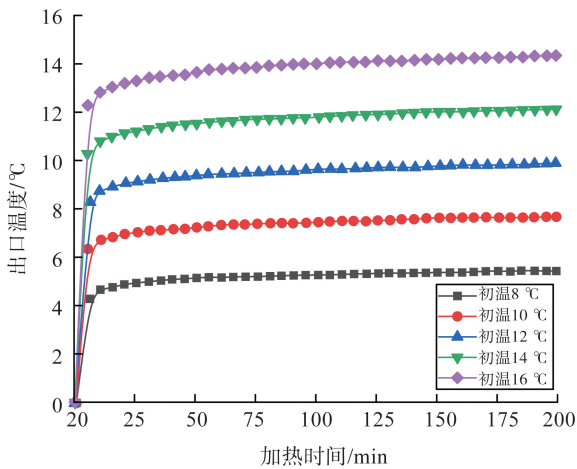


图 12 不同输入进口温度的温度差变化

Fig.12 Variation of temperature difference for different input inlet temperatures

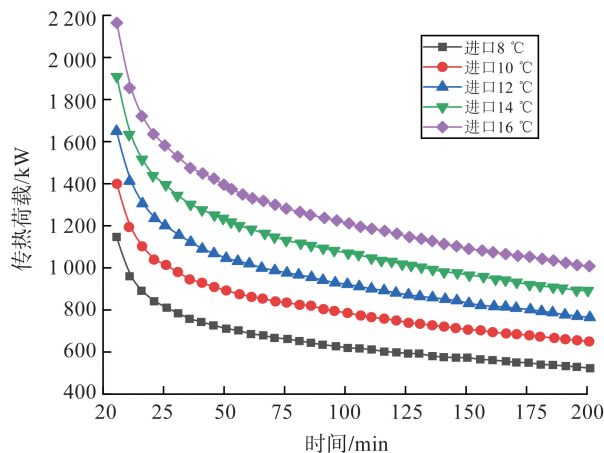


图 13 不同温度下系统融雪传热负荷

Fig.13 Heat transfer load of the system for snow melting at different temperatures

### 2.2.5 管道直径对融雪效果的影响

不同管道直径下桥面无雪率随时间的变化规律如图 14 所示。随着加热时间的增长,不同管道尺寸下的桥面无雪率不断增大;大尺寸管道的桥面开

始融雪的时间小于小尺寸管道,但两者时间相差较小;管道尺寸越大,越早开始融雪,所需的融雪总时间越少,桥面融雪的速率越快,例如管径 25 mm 的桥面融雪开始时间要比管径 15 mm 的开始时间早约 10 min,达到近乎完全融雪的时间要短约 20 min,可见管径的大小也会对桥面融雪产生一定的影响,该影响主要体现在初融时间的缩短和总融雪时长的减少,但综合表现为管道直径的变化对桥面结构传热性能影响较小,考虑经济性宜选用 15 mm 小管径管道。

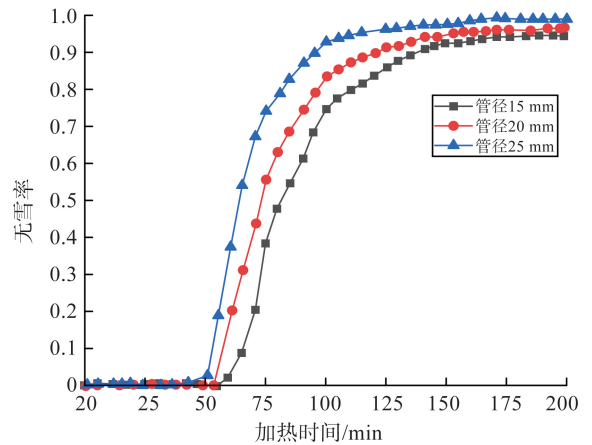


图 14 不同管径尺寸对道路融雪效果的影响

Fig.14 Effect of different pipe sizes on the result of snow melting on roads

## 2.3 流体温度沿程损失及对融雪效果的影响分析

### 2.3.1 管道流体温度沿程损失规律

流体在管道内流动时将热量传递到上部和下部结构中。流体与路面结构热传递过程中,周围桥梁结构温度上升,管内流体温度下降,且二者间温度差越大,温度传递效率越高。另一方面,管内流体温度下降,周围结构温度升高,温度差进一步下降,传热效率降低,表现出一种非线性的温度衰减效应。对于流程较短、利用初始温度较低的浅层地热为热源的热管来说,温度下降速率较低,温度衰减的变化率较小,近似呈现出一种线性的衰减规律,如图 15 所示。

由图 15 可知:在管道间距均为 0.2 m,  $t=10$  min 时,温度衰减尤为明显,在流体沿着管道流动距离仅为 15 m 的时候,温度由初始时刻的 10 °C 衰减为 8.7 °C,同比温度衰减了 13%,散失的热量用于向结构内部传热耗散,当传到桥梁表面用于桥面的融雪化冰时衰减效应较为明显;在  $t=100$  min 时,同样流动距离为 15 m 的流体,温度衰减 9.2 °C,同比初始温度仅仅衰减了 8%;而在  $t=190$  min 时,流动距离为 15 m 的流体其温度衰减 9.38 °C,衰减幅度进一步下降,这是因为初始时刻流体与管道之间的温度

梯度最大,因此传热效率最高,温度衰减最为显著,当流体与道路结构之间的温度梯度逐渐减小,传热效果会逐渐降低,致使温度衰减速率减小。不同加热时间和流动距离下温度变化曲线见图16。

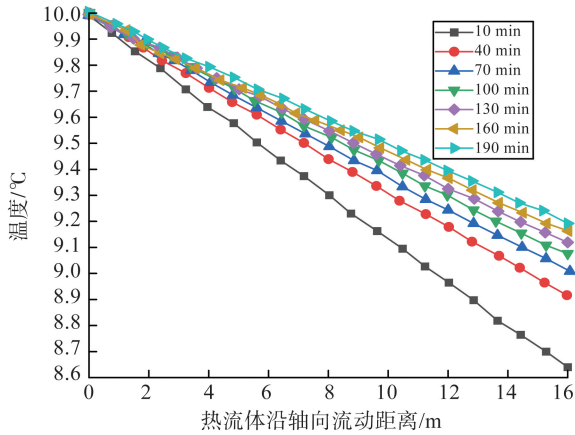


图15 不同时刻管道流体的温度衰减

Fig.15 Temperature decay of the pipeline fluid at different moments

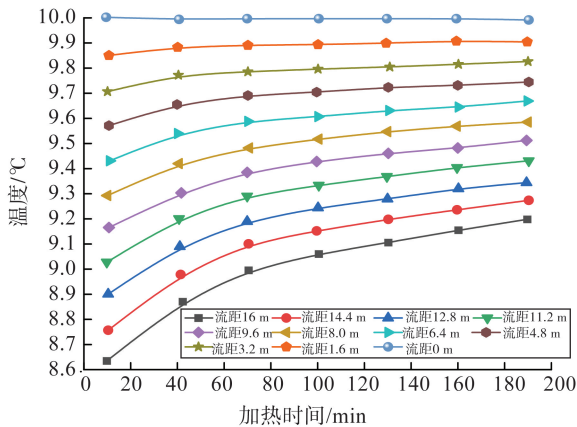


图16 不同加热时间、流动距离的流体温度变化

Fig.16 Temperature variation of fluid at different flow distances with increasing heating time

由图16可以看出,在保持初始输入温度均为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下,随着流体流动距离的增加,流体温度均有较明显的衰减,例如当流动距离为 $8\text{ m}$ 时,其温度衰减 $0.68\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,当流动距离为 $16\text{ m}$ 时,其温度衰减达到了 $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。由于后续存在初温皆为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 流体的持续供给流入,不同流动距离处的温度均会有一定程度的升高,这是因为一方面有外部热量的持续输入,另一方面结构温度的缓慢升高导致温度差的减小即传热效率的减小,温度下降幅度又同比小于初始时刻,故不同距离处的温度均会有升高的趋势。

### 2.3.2 流体温度沿程损失对桥面融雪的影响

由上述分析可知,管内流体温度随着流动距离的延长发生衰减,但随着加热时间的增长,管内流体温度衰减幅度呈现减小的趋势。随着管道铺设

长度的增长,这种因温度沿程衰减导致的统一循环回路内不同位置处温度差会越发增大,该温度分布的不均匀性也会直接导致上部结构传热的不均匀性,使得道路表面融雪呈现非均匀性。

结合上述数值模拟的分析结果,得到不同条件下的融雪计算结果及分析,采用上述验证的数值方法对热管桥面融雪效能关键影响因素进行模拟分析。其大体融雪规律和阶段性特征见图17。

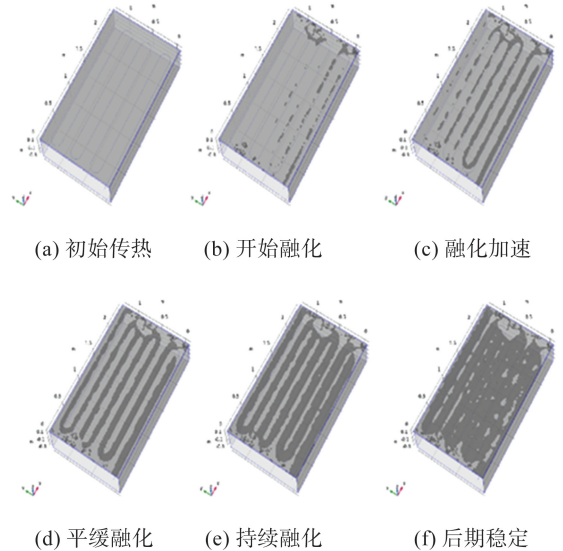


图17 桥面融雪非均匀特性

Fig.17 Bridge deck snow melting non-uniform characteristics

图17直观显示了加热过程桥面的融雪状态的变化(图中深灰色代表无雪区域),结合初始设置的标准工况下的结果图,可将融雪过程简要概述为3个典型阶段:初始传热阶段、快速融化阶段、平缓融化阶段。

其中,初始传热阶段主要为流体与管道之间、管道与混凝土之间的传热,在此过程中流体散热加热管道和混凝土,深层混凝土温度升高并向路面层传热;快速融化阶段为混凝土表面温度升高,与之接触的表面冰雪吸热开始融化,此时路面无雪率快速上升,由于管道流体沿着管道流动时散失热量,存在沿程温度损失,导致出现沿着管道流体流动方向融雪效果依次减弱的现象,具体表现为进水口附近先开始融雪,出水口附近的融雪时间有一定的滞后,融雪速率相应减小;平缓融雪阶段道路结构温度持续升高,与路面雪层之间的温度梯度增大,融雪热负荷增大,但此时一部分能量用于冰雪吸热但温度不发生变化,路面开始平缓融雪化冰,直至道路冰雪完全融化,路面结构温度持续升高,最后在流体加热和外部环境的双重影响下达到一个新的温度平衡的状态。

### 3 结论

利用 COMSOL Multiphysics 多物理场耦合仿真平台,构建了循环管道加热桥面融雪化冰效能分析的三维计算模型。基于此数值模型,研究了管道布置参数、进口流体温度、积雪层厚度和流体温度沿程损失等关键因素对循环流体加热道路融雪性能的影响规律,主要结论如下。

(1)管道布置参数对桥面热管融雪性能具有重要影响,在本研究设定的标准工况下,考虑实用性与经济性,选择间距 0.20 m、埋深 0.08 m、直径 0.015 m 进行热管管道空间布置。

(2)积雪层厚度增加导致吸收和储存更多的热量,使得热量无法快速传递,厚度超过 0.04 m 会显著降低热管融雪系统的融雪速率,因此降雪开始时,应尽快通过融雪系统清除积雪,以保证融雪效率。

(3)管道进口流体温度的提升使得融雪速率不断增加,但融雪速率的增长率逐渐减小;随温度的上升,温度梯度的差值减小,系统传热效率降低,桥面融雪效果也随之减弱。

(4)热量传递过程中,管内流体与桥面结构的温差不断缩小,传热效率降低,表现出一种非线性的温度衰减效应;对于流程较短、初始温度较低的浅层地热作为热源的热管来说,温度下降速率较低,温度衰减的变化率较小,近似呈现出一种线性的衰减规律。

(5)循环流体加热桥面融雪过程分为 3 个阶段:初始传热阶段、快速融雪阶段、平缓融雪阶段。其中初始传热阶段为道路内部热传递,表面无雪率不显著变化;快速融雪阶段无雪率变化幅度最大,融雪速率最快;平缓融雪阶段的表面无雪率变化较为缓慢,一直持续到桥面冰雪完全融化。

#### 参考文献:

[1] 刘状壮,季鹏宇,张有为,等.基于可视化文献计量分析的道路除冰雪技术研究进展[J].冰川冻土,2023,45(3):1180-1194.  
LIU Zhuangzhuang, JI Pengyu, ZHANG Youwei, et al. Research progress of road snow and ice removal technology based on visualized bibliometric analysis [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(3): 1180-1194.

[2] 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.

[3] 刘凯,王选仓,王芳.中外高速公路融雪化冰技术和方法[J].交通企业管理,2009,24(8):73-74.  
LIU Kai, WANG Xuancang, WANG Fang. Chinese and foreign highway snow melting and ice melting technologies and methods [J]. Transportation Enterprise Management, 2009, 24(8): 73-74.

[4] LIU K, HUANG S, JIN C, et al. Prediction models of the thermal field on ice-snow melting pavement with electric heating pipes [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 120:269-276.

[5] GIULIANI F, MERUSI F, POLACCO G, et al. Effectiveness of sodium chloride-based anti-icing filler in asphalt mixtures [J]. Construction and Building Materials, 2012, 30:174-179.

[6] EQUIZA M A, CALVO-POLANCO M, CIRELLI D, et al. Long-term impact of road salt (NaCl) on soil and urban trees in Edmonton, Canada [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2017, 21:16-28.

[7] XU H N, TAN Y Q. Modeling and operation strategy of pavement snow melting systems utilizing low-temperature heating fluids [J]. Energy, 2015, 80:666-676.

[8] BOYD T L. New snow melt projects in Klamath Falls, OR [J]. Geo-Heat Center Quarterly Bulletin, 2003, 24(3):12-15.

[9] BRUN E. Investigation on wet-snow metamorphism in respect of liquid-water content [J]. Annals of Glaciology, 1989, 13:22-26.

[10] LIU X, REES S J, SPITLER J D. Modeling snow melting on heated pavement surfaces: Part I: model development [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(5/6):1115-1124.

[11] ZHAO W, WANG L, ZHANG Y, et al. Snow melting on a road unit as affected by thermal fluids in different embedded pipes [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 46:101221.

[12] BALBAY A, ESEN M. Experimental investigation of using ground source heat pump system for snow melting on pavements and bridge decks [J]. Scientific Research and Essays, 2010, 5(24):3955-3966.

[13] HAN C, YU X B. Feasibility of geothermal heat exchanger pile-based bridge deck snow melting system: a simulation based analysis [J]. Renewable Energy, 2017, 101:214-224.

[14] LIU X, REES S J, SPITLER J D. Modeling snow

- melting on heated pavement surfaces. part II: experimental validation[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(5/6):1125-1131.
- [15] WP C. Design of snow melting systems[J]. Heat Vent, 1952, 49:88-95.
- [16] WILLIAMS G P. Design heat requirements for embedded snow-melting systems in cold climates [ J ]. Transportation Research Record, 1976, 576:20-32.
- [17] KILKIS I B. Design of embedded snow-melting systems; Part 2: heat transfer in the slab; a simplified model[J]. ASHRAE Transactions, 1994, 100(1):434-441.
- [18] REES S J, SPITLER J D, XIAO X. Transient analysis of snow-melting system performance[J]. ASHRAE Transactions, 2002, 108(2):406-423.
- [19] WANG H, ZHAO J, CHEN Z. Experimental investigation of ice and snow melting process on pavement utilizing geothermal tail water[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(6):1538-1546.
- [20] XU H, TAN Y. Modeling and operation strategy of pavement snow melting systems utilizing low-temperature heating fluids[J]. Energy, 2015, 80:666-676.
- [21] YU X, HURLEY M T, LI T, et al. Experimental feasibility study of a new attached hydronic loop design for geothermal heating of bridge decks[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 164:114507.
- [22] LIU Y P, DONG B, HONG T Z, et al. ASHRAE URPI-1883: development and analysis of the ashraeglobal occupant behavior database[J]. Science and Technology for the Built Environment, 2023, 29(8):749-781.
- [23] ZHAO W, CHEN X, WANG W, et al. Numerical study on thermal performances of bare, circular and rectangular finned pipes for road heating[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2020, 140:1147-1157.
- [24] 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, 2012.  
XU Huining. Modelling and simulation analysis of fluid-heated road snow-melting system with temperature-wetness coupling[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [25] 赵艳霞. 沥青混合料热膨胀系数的测量方法及影响因素研究[J]. 低碳世界, 2020, 10(4):177-178.  
ZHAO Yanxia. Study on the measurement method and influencing factors of coefficient of thermal expansion of asphalt mixture[J]. Low Carbon World, 2020, 10(4):177-178.
- [26] 乔自磊, 钱欣童. 沥青混凝土物性参数特性研究[J]. 河南科技, 2014(12):71.  
QIAO Zilei, QIAN Xintong. Characterization of physical parameters of asphalt concrete[J]. Henan Science and Technology, 2014(12):71.
- [27] 陈占权, 李波, 任小遇, 等. 沥青混合料热膨胀系数的测量方法及影响因素确定[J]. 中外公路, 2019, 39(3):199-207.  
CHEN Zhanquan, LI Bo, REN Xiaoyu, et al. Measurement methods for coefficient of thermal expansion of asphalt mixtures and determination of influencing factors [ J ]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(3):199-207.
- [28] ZHAO W, WANG L, ZHANG Y, et al. Snow melting on a road unit as affected by thermal fluids in different embedded pipes [ J ]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 46:101221.
- [29] ZHAO W, LI L, WANG W, et al. Thermal performances of porous snow by a hydronic heating system at different weather conditions [ J ]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2020, 141:1519-1528.

(编辑:郭少华)