

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211120054

用于机场道面融雪的能源桩系统优化研究*

闫振国^{1,2}, 曾 姝¹, 杨 军¹, 江 帆², 张文华², 楚玉川²

(1. 清华大学土木系, 北京 100084; 2. 海军研究院, 北京 100071)

摘要: 研究以数值分析为手段, 以能源桩系统为对象, 将融雪过程以微分方程的形式输入至数值模型, 分析桩内回路对能源桩取热的影响, 比较增设储热水箱与直接利用浅层地热能对系统融雪效果的不同。结果表明: 能源桩内部回路为螺旋型布置时, 能够提供较多的浅层地热能。利用能源桩系统为道面提供热量进行融雪, 随持续时间的增加, 可融雪面积减小。当增设储热水箱时, 系统运行过程分为雪前储热和雪中融雪两个阶段。保证水箱在雪前储热阶段达到稳定温度, 有效增加可融雪面积, 并随储能水箱体积的增加, 达到稳定温度所需时间增加, 可融雪面积边际效用递减。在实际使用过程中, 增加储能水箱可明显提升能源桩系统的融雪水平, 水箱体积的确定需要根据融雪能耗和机场管理情况综合确定。

关键词: 浅层地热能; 能源桩; 机场道面; 融雪

中图分类号: TU883.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)05-0881-07

Study on Optimization of Energy Pile System for Snow Melting on Airport Pavement

YAN Zhenguo^{1,2}, ZENG Shu¹, YANG Jun¹, JIANG Fan², ZHANG Wenhua², CHU Yuchuan²

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Naval Research Institute, Beijing 100071, China)

Abstract: In this study, by means of numerical analyses, taking the energy pile system as the object, the snow melting process is input into the numerical model in the form of differential equations, and the influence of the loop inside the pile on heat extraction is analyzed; the difference in snow melting effect between adding heat storage water tank and direct shallow geothermal energy methods is compared. The study shows that when the internal loop of the pile is spiral, it can provide more shallow geothermal energy. The energy pile system is used to provide heat for the pavement to melt snow, and the area of melting snow decreases with the increase of duration. When the heat storage tank is added, the operation process of the system can be divided into two stages: pre-snow heat storage and snow melting. Ensuring that the water tank reaches a stable temperature in the pre-snow heat storage stage can effectively increase the snow-melting area. Additionally, with the increase of the water tank volume, the time needed to reach the stable temperature increases, and the snow-melting area shows the diminishing marginal utility. In the process of practical use, increasing the energy storage tank can

* 收稿日期: 2021-11-20; 修回日期: 2022-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078274)资助

作者简介: 闫振国(1988—), 男, 博士研究生。主要从事地下能源结构研究。E-mail: yzgj17@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者: 杨军(1974—), 男, 研究员, 博士。主要从事地下工程方面的研究。E-mail: junyang@tsinghua.edu.cn

significantly improve the snow melting ability of the energy pile, and the determination of the water tank volume needs to be taken into consideration comprehensively according to the snow melting energy consumption and airport management.

Keywords: shallow geothermal energy; Energy pile; Airport pavement; Snow melting

引言

降雪对机场、道路等交通设施造成影响,为人类的出行带来不便。尤其对于机场,降雪是造成冬季民航航班延误、取消,发生事故的最重要原因,融雪除冰也成为机场冬季最主要的工作之一。

20世纪80年代以来,我国机场的融雪除冰工作从主要靠人工除雪发展至现今普遍采用推雪、扫雪、吹雪复合式除雪设备,不断提高除雪效率,减少人工需求,但设备运行能耗大、尾气排放多;当降雪时气温不低于 $-3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,可使用化学融雪剂(工业用盐)进行融雪作业,但氯离子会侵蚀道面,同时污染环境,阻止植物生长^[1]。为消除上述除融雪方式的局限性,避免其对环境的影响,在新建机场时,增加道面自身除融雪功能成为航空界普遍关注的问题,并衍生出道面改性和道面加热两个研究方向。前者通过对表层涂装,或将道面改性,如将沥青混凝土改为聚氨酯混凝土^[2],使道面上不易积雪;后者通过直接通电加热法^[3]、热管法^[4]、液体循环加热法^[5]等提高道面温度,使降雪快速融化。其中,电加热法耗电量高,能效低;热管内的相变材料达到其温度阈值自动传热,不易控制;液体循环加热法因能源来源多样、能效高,过程可控,逐渐成为研究和利用的重点^[6],当使用浅层地热能时,能耗最低,温室气体排放和运营成本最小^[7],更是助力我国实现“碳达峰、碳中和”的有效途径。同时,在使用该系统时,道面可兼做太阳能收集器,通过夏季的热能储存,实现地下土体的冷热均衡^[8-9]。在研究过程中,往往分为道面融雪和地热能供给两部分。道面融雪主要集中在融雪能耗需求上,目前主要使用ASHRAE设计手册提出的稳态方程,该方法计算效率高,结果相对准确,在桥面、机场道面融雪能耗需求研究中得到广泛使用^[10-11]。融雪现象是瞬态过程,基于此,H. N. Xu等^[1]通过FORTRAN语言实现瞬态过程时间步的叠加,得到国内十几个大中城市的典型融雪能耗需求。浅层地热能的供给,较多借鉴现有成果,根据不同的地热交换器形式,选取

对应成果加以利用。能耗供需端的连接往往通过地源热泵或水箱,其中,地源热泵可提升道面融雪时的液体温度,有效提高融雪效率^[12],但热泵装置较大,所需设备用房实际工程中较难满足;单纯使用水箱,则需要的体积较大,日本相关工程表明:利用水箱供热,695 m²道路所需水箱体积为230 m³^[13]。G. Q. Kong等^[14]通过利用地热能桥面融雪现场试验,表明地热交换器并辅以水箱,可达到与地源热泵相近的效果。党政等^[15]通过CFG能源桩对混凝土路面除冰降温的试验研究证明了仅使用水泵为回路内流体提供动力进行循环,也可以产生明显的除冰效果。

综上所述,利用浅层地热能融雪,与建筑物温控的供能方式差别较大:提供地热能时需要短期持续的热量供给,而不是周期性、间断性取热供暖;以最大地热能供给量为目标,而不是整个供暖季节的供给均衡。在此基础上,本文结合拟于北京大兴区开展的利用能源桩系统进行道面的融雪试验,通过数值模拟的方式,以能源桩系统为研究对象,融雪过程以微分方程的形式作为研究输入条件,对下述两个问题进行进一步讨论:以浅层地热能最大供给量为目标的能源桩较佳回路布置形式,以及相比直接由能源桩提供热能,增设储能水箱对融雪的促进作用。

1 模型建立

数值模型可以通过详细建模,赋值合理参数,较好还原传热的真实场景。能源桩传热时,受周边环境影响较大,地表温度影响能源桩传热的边界条件,地下温度场分布决定了蕴含的浅层地热能,而岩土体的热物理性质,影响能源桩的换热性能。为此模型建立时首先对待模拟的环境进行分析,尽可能地还原至模型中。

1.1 场址温度场

地下温度受地表温度影响,并体现出一定的滞后性,具体可表现为深度和时间的函数,如式(1)

所示^[16]:

$$T(z,t) = T_m + T_a e^{-z\sqrt{\frac{\omega}{2a_s}}} \cos\left[\omega(t-t_0) - z\sqrt{\frac{\omega}{2a_s}}\right] \quad (1)$$

其中, T_m 为年平均气温, $^{\circ}\text{C}$; T_a 为年温度变化幅值, $^{\circ}\text{C}$; z 为地层深度, m ; ω 为温度变化频率, $2\pi/365 \text{ d}^{-1}$; a_s 为土壤热扩散系数, m^2/s ; t 为时间, d ; t_0 为最高气温出现的时间, d 。

选取试验场地的上述气象资料, 得到图 1 所示的不同月份的地温分布。选取一月份的数据作为地温曲线, 一月份的平均温度为地表温度。

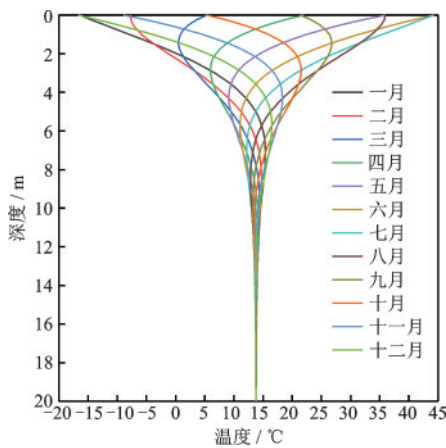


图 1 地温分布

Fig.1 Distribution of ground temperature

1.2 传热介质热物性

根据现有工程的地质勘查报告, 拟试验场址处地表以下土体基本为饱和黏土。据此, 根据《桩基地热利用技术标准》(JGJ/T438—2018)^[17], 选择相关热物性参数见表 1。

表 1 热物性参数

Table 1 Thermophysical parameters

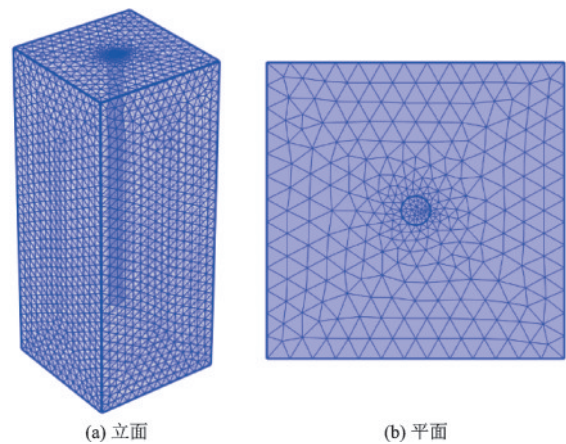
介质	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	比热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
管道	950	0.42	2 200
混凝土	2 500	2	970
饱和土	2 000	1.7	1 325
流体	998.2	0.6	4 182

1.3 系统运行时间

目前, 随着大气物理和动力学相关理论的发

展, 通过使用遥感卫星等气象观测、数据采集手段, 结合速度更快、功能更强大计算机模拟, 气象有效预报可达 9~10 d^[18]。结合《美国空军冰雪控制计划指南与规程》(Afi32—1002)^[19], 定义用于融雪除冰的能源桩短期传热为 7 d。对于融雪过程, 根据 H. N. Xu 等^[1]热-质耦合模型的研究结果, 北京降雪持时一般不超过 24 h, 雪前进行 5 h 的预加热, 可有效减少融雪所需的能量, 定义融雪过程的系统运行时间为 29 h。

结合能源桩传热特性及传热时间, 选取 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ 的立方体作为传热空间, 能源桩置于其中, 并进行网格划分如图 2 所示。空间四周及底面边界条件为绝热, 顶面温度为地表温度, 沿深度方向的赋以图 1 中一月份的地温曲线。桩内回路使用 COMSOL 软件中的管道传热物理场模块, 通过对线段的建模和划分网格, 可有效模拟管道内液体、液体与管壁、管壁与周边介质的传热过程。



(a) 立面

(b) 平面

图 2 有限元模型示意

Fig.2 Finite element model

2 最佳回路形式

能源桩通过桩内回路的液体循环实现与桩周土的热交换。已有研究通过数值模拟、现场实测, 证明当能源桩用于建筑物供热时, 螺旋型回路拥有较 U 型、双 U、三 U 等回路更佳的传热性能, 体现为等功率取热时, 螺旋回路需要的桩长更短, 能够更好地控制峰值负荷^[20], 并且可避免多 U 型回路由于上部弯曲造成的气阻。当用于融雪时, 螺旋回路是否能够提供更多的地热能, 选取相同入口温度的螺旋型、单 U 型、3U 型能源桩进行分析。

能源桩以及内部回路尺寸见表2,模型如图3所示。在回路设计时,螺旋型回路的螺距较小(小于25 cm)会造成明显的水头损失、相邻管道产生热干扰现象^[21]。对于管道内的循环水流速,选取保持在湍流(雷诺数 $Re \geq 8\ 000$),但又在合理范围内的 $0.4 \sim 1.2\ \text{m/s}$ ^[22]。在上述约束条件

下,各类型回路体积流速设定为 $0.51\ \text{s}$,单U型回路能增设 $1\ \text{m/s}$ 的流速;对于螺旋回路,当管道内径为 $32\ \text{mm}$ 时, $0.9\ \text{m}$ 螺距的螺旋回路拥有与3U型回路相同的回路长度,当螺旋回路选取常规使用的内径 $25\ \text{mm}$ 管道时,螺距分别选取 $0.45\ \text{m}$ 和 $0.3\ \text{m}$ 。

表2 能源桩尺寸

Table 2		Dimensions of the energy pile					单位:mm	
参数	桩长	桩径	回路类型	螺旋直径(竖向间距)	轴向节距	管道内径	管道壁厚	
尺寸	20 000	1 000	螺旋型	800	300/450/900	25/25/32	2.3/2.3/3	
			U型	800	—	32	3	
			3U型	566	—	32	3	

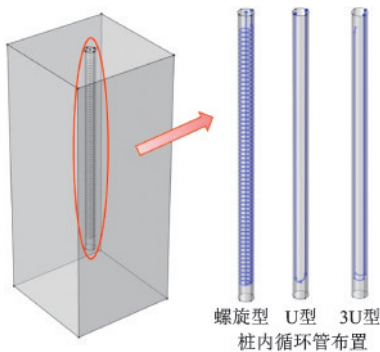


图3 能源桩及桩内循环管布置示意

Fig.3 Energy pile and internal configurations of pipe

由图4可知,能源桩取热过程中,出口温度随传热时间的增加而减小,并趋于稳定。传热时间相同时, $1\ \text{m/s}$ 流速的单U型回路出水口温度最小;单U, $90\ \text{cm}$ 螺距的螺旋型, 3U , $45\ \text{cm}$ 、 $30\ \text{cm}$ 螺距的螺旋型回路的出水口温度依次增加。其中, 3U 型、 $90\ \text{cm}$ 螺距的螺旋形回路出口温度相近。同时,根

据单U型回路的出口温度可知,流速较小时,出口水温较高,循环液体与周围介质换热较充分。但是,能源桩的取热功率如式(2)所示,其不仅取决于循环时的取热量(即温差),更与取热速度(流速)有关,是两者的乘积,热交换充分的代价是流速减小。

$$Q = m_w c_w (t_{\text{out}} - t_{\text{in}}) \quad (2)$$

其中, m_w 为循环液体的体积流量, kg/s ; c_w 为循环液体的体积热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; t_{in} 为能源桩的进口温度, $^\circ\text{C}$; t_{out} 为能源桩的出口温度, $^\circ\text{C}$ 。

根据图5所示,U型回路传热功率最小,且不同流速的回路传热功率相近,可见在上述两个流速下, $0.51\ \text{s}$ 的体积流速恰好利用其与周边的充分换热,弥补了流速小的不足。具有相同回路长度的 3U 型回路与 $0.9\ \text{m}$ 螺距的螺旋回路传热功率相近,小于 $0.45\ \text{m}$ 、 $0.3\ \text{m}$ 螺距的螺旋回路传热功率,可见回路与周边介质的传热面积,是影响传热功率的主要原因,而螺旋形回路,可有效增加与周边介质的传热面积,在合理范围内,螺距越小,传热功率越大。

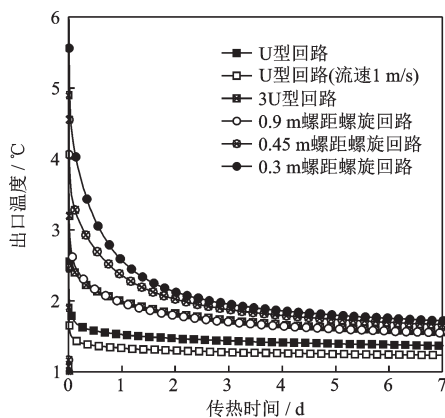


图4 不同回路的能源桩出口水温

Fig.4 Outlet water temperature of different pipe configurations

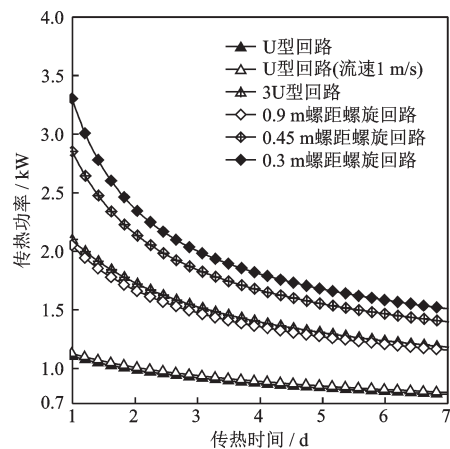


图5 不同回路的能源桩传热功率

Fig.5 Power of different pipe configurations

3 水箱对地热能供给影响

根据前文所述,利用浅层地热能对道面等交通设施融雪作业,可根据设置储热水箱与否将加热方式分为如图6所示的直接融雪或通过储热水箱间接融雪两种方式。直接融雪时,能源桩汲取的热量直接用于融雪,即公式(3)。根据H. N. Xu等^[1]的相关研究成果,选取与本文工作相匹配的融雪所需能耗 640 W/m^2 。

$$q(t) = m_w c_w (t_{\text{out}} - t_{\text{in}}) = p_{\text{sm}} A_{\text{sm}} \quad (3)$$

其中, A_{sm} 为融雪面积; p_{sm} 为融雪所需功率。

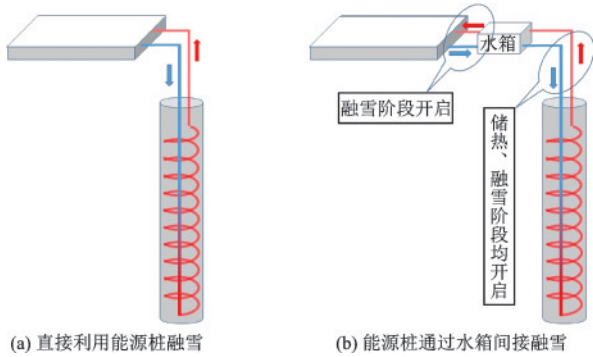


图6 两种利用能源桩的融雪方式

Fig.6 Two methods of snow melting by using energy piles

将式(3)输入数值模型,可融雪面积随能源桩运行时间的增加而减小(图7),当运行至29 h,即融雪结束时,可融雪面积为 4.3 m^2 。

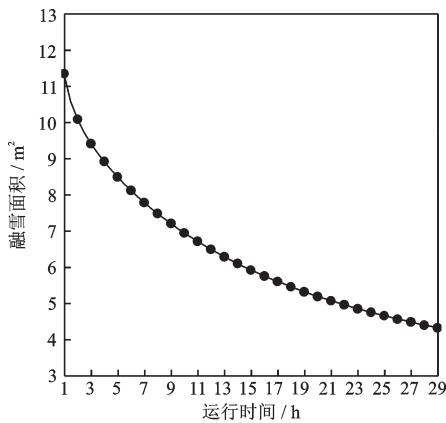


图7 可融雪面积随运行时间的变化

Fig.7 Variation of melting snow area with time

将水箱作为储能设施,在降雪过程中利用储热水箱中预先加热的液体对道面进行加热,并且在加热过程中保持能源桩的运行。上述运行可分为两

个阶段,水箱内液体加热阶段和融雪阶段。

对于第一阶段,以能源桩为研究对象,由于水箱的存在, $t+dt$ 时刻能源桩的进口温度,等于 t 时刻的进口温度(即水箱的温度)与该时刻经由能源桩向水箱传递的地热能带来的改变,其数学表达式如式(4)所示。同时,将式(3)代入式(4)中,即得到 t 时刻水箱内温度变化的微分方程式(5)。

$$T_{\text{in}}(t+dt) = T_{\text{in}}(t) + \frac{Q(t)}{V\rho_w c_w} \quad (4)$$

$$\frac{dT_{\text{in}}(t)}{dt} = \frac{v_w}{V} [T_{\text{out}}(t) - T_{\text{in}}(t)] \quad (5)$$

使用COMSOL有限元软件中的全局常微分和微分代数方程模块,对第一阶段进行模拟。当储热水箱体积为 1 m^3 且储满水时(后续均假定水箱储满水),能源桩在第一阶段的进出口水温变化如图8所示。可见随着运行时间的增加,进口水温不断升高,出口水温在经过前期短暂的震荡后,也随之升高,当运行至12 h,进出口水温相等,为 $12.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 。此后,进出口水温基本相等并略有增加,在循环过程中与土体进行微弱的热交换。在实际融雪系统运行时,将进出口水温相等时的温度定义为水箱稳定温度,并作为第二阶段的初始温度。

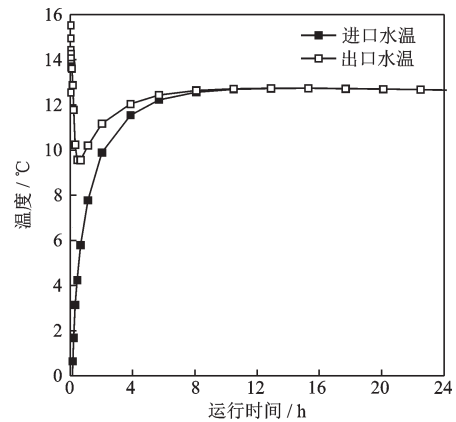


图8 水箱 1 m^3 时能源桩的进出口水温分布

Fig.8 Water temperature distribution at inlet and outlet of the energy pile with 1 m^3 water tank

第二阶段,由储热水箱和能源桩共同为融雪提供热量,能源桩入口温度随着融雪过程所需热量大于能源桩补给而持续降低,如式(6)所示,整理可得(7)所示的微分方程。

$$T_{\text{in}}(t+dt) = T_{\text{in}}(t) - \frac{P_{\text{sm}} A_{\text{sm}} - Q(t)}{V\rho_w c_w} dt \quad (6)$$

$$\frac{dT_{in}(t)}{dt} = \frac{v_w}{V} [T_{out}(t) - T_{in}(t)] - \frac{P_{sm} A_{sm}}{V \rho_w c_w} \quad (7)$$

值得注意的是,在该阶段,若融雪结束时储能水箱的温度仍大于直接利用能源桩融雪时的进口温度,则说明系统未能发挥最佳融雪功效;若在融雪过程中,水箱温度与直接利用能源桩融雪的进口温度相等,则在其后水箱未能发挥作用,且因水箱内额外的液体体积导致融雪端进出口温差减小,影响融雪效果。所以,定义至融雪结束时,水箱中液体温度恰好与直接利用能源桩融雪的进水口温度相等,为系统的最佳融雪状态。基于此,对不同体积水箱对应融雪面积的计算结果如图9所示。

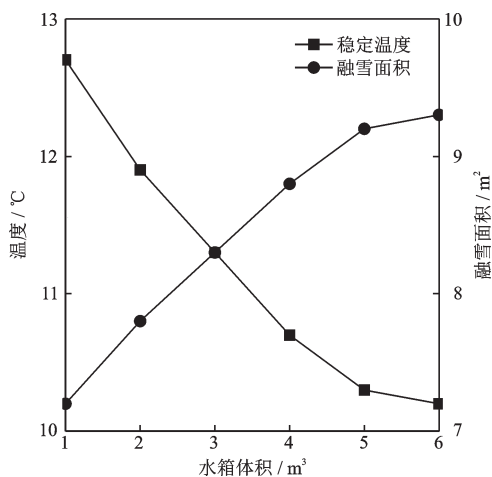


图9 不同体积水箱对应融雪面积

Fig.9 Areas of snow melting with different water tank volumes

由图7、图9可知,当融雪结束时,直接利用能源桩提供地热,可融雪面积为4.3 m²。增设储能水箱后,水箱体积为1 m³时即可将融雪面积提升至7.2 m²,提升67%;当水箱面积为4 m³时,融雪面积为8.8 m²,大于两根能源桩直接向融雪提供的地热能。综上,增设储能水箱,可有效提高融雪面积。

同时,储热水箱体积从1 m³增至6 m³时,稳定温度由12.7 °C降至10.2 °C,可融雪面积从7.2 m²增至9.3 m²。第一阶段水箱稳定温度的变化由能源桩的传热性质决定。随着能源桩从土体吸热的持续进行,由于土体的导热性能有限,汲取的热量不能满足水箱体积增加所需的热量,造成表观上水箱稳定温度的逐渐下降,但是下降速率减小,可见在此过程中能源桩仍在不断汲取地热能,但汲取速率下降。对于第二阶段,随着储热水箱体积的增加,可

融雪面积增加,新增融雪面积递减。该现象是因为储能水箱体积增加,其在到达稳定温度时,存储的浅层地热能增加,但是由于第一阶段稳定温度的下降,造成储热水箱的储能未能随体积增加而等增长率增加,所以新增融雪面积呈边际效用递减。

同时,相同能源桩,随着储能水箱体积的增加,水箱内水温达到稳定所需的传热时间增加,当水箱体积为6 m³时,需要运营时间为5 d,结合融雪过程,共计约一周时间。在实际融雪系统运行时,若要降雪前近一周就开启系统,对天气预报准确程度、融雪工作的准备,都带来极大的挑战,具有不确定性。

4 结 论

采用数值方法,实现了以道面融雪目标为输入条件的能源桩系统融雪过程模拟。分析在机场道面融雪的应用场景下,能源桩较佳的回路布置形式以及增设储能水箱与否对融雪效能的影响。相关研究结论如下:

(1) 能源桩用于短历时持续吸热,桩内的回路形式对其传热影响较大。其中,螺旋回路能够提供与周围传热介质更大的接触面积,所以能提供的浅层地热能更多。

(2) 直接使用能源桩为融雪提供地热能时,随降雪持时的增加,可融雪面积减小,选取计算持时最后时刻的融雪面积作为设计值较为合理。

(3) 增设储热水箱为融雪提供地热能,可明显提升可融雪面积;水箱体积增加,可融雪面积呈边际效用递减。并且,随着水箱体积的增加,箱内水温达到稳定所需的时间增加,提升了系统实际操作难度与复杂性。

根据上述研究结论,后续使用能源桩进行融雪作业,可将增设储热水箱作为提升融雪能力的有效手段。水箱体积需根据融雪面积,并结合机场管理养护方案综合决定。与此同时,本次研究主要以能源桩为研究对象,未考虑储热水箱、连接管道等构件在运行期间的热耗散,实际融雪面积可能小于计算值,后续试验时需对此进行充分考虑,并进一步做好各设施的保温隔热措施。并且,在实际工程中,能源桩往往以群桩的形式呈现,传热过程中桩之间的相互影响,群桩与水箱连接方式,都需要进一步研究,也是笔者后续工作的主要内容之一。

参考文献:

- [1] Xu H N, Wang D W, Tan Y Q, et al. Investigation of design alternatives for hydronic snow melting pavement systems in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 170: 1413-1422.
- [2] Chen J, Ma X, Wang H, et al. Experimental study on anti-icing and deicing performance of polyurethane concrete as road surface layer [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 161: 598-605.
- [3] Sassani A, Ceylan H, Kim S, et al. Development of carbon fiber-modified electrically conductive concrete for implementation in Des Moines International Airport [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2018, 8: 277-291.
- [4] 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.
- [5] 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 H N. Development and simulation of a heat and mass coupled snow melting model for hydronic heated pavement [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [6] Vieira A, Maranha J, Christodoulides P, et al. Characterisation of ground thermal and thermo-mechanical behaviour for shallow geothermal energy applications [J]. *Energies*, 2017, 10(12): 1-51.
- [7] Shen W, Ceylan H, Gopalakrishnan K, et al. Life cycle assessment of heated apron pavement system operations [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2016, 48: 316-331.
- [8] Wu D, Kong G Q, Liu H L, et al. Performance of a full-scale energy pile for underground solar energy storage [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, 27: 1-13.
- [9] Wang H, Jasim A, Chen X D. Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications—a comprehensive review [J]. *Applied Energy*, 2018, 212: 1083-1094.
- [10] Han C J, Yu X. Feasibility of geothermal heat exchanger pile-based bridge deck snow melting system: a simulation based analysis [J]. *Renewable Energy*, 2017, 101: 214-224.
- [11] 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.
- [12] Li T, Yu X B, Habibzaden O, et al. Heating performance of a novel externally-heated geothermal bridge de-icing system: field tests and numerical simulations [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 46: 1-16.
- [13] Yoshitake I, Yasumura N, Syobuzako M, et al. Pipe heating system with underground water tank for snow thawing and ice prevention on roads and bridge decks [J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2011, 25(2): 71-86.
- [14] Kong G Q, Wu D, Liu H L, et al. Performance of a geothermal energy deicing system for bridge deck using a pile heat exchanger [J]. *International Journal of Energy Research*, 2018, 43(1): 596-603.
- [15] 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 Z, Guan W, Cheng X H, et al. Experimental study on CFG energy pile for concrete pavement deicing and cooling [J]. *China Journal Highway Transport*, 2019, 32(2): 19-30. (in Chinese)
- [16] Brandl H. Energy foundations and other thermo-active ground structures [J]. *Géotechnique*, 2006, 56(2): 81-122.
- [17] 桩基地热能利用技术标准: JGJ/T 438—2018 [J]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [18] Alley R B, Emanuel K A, Zhang F. Advances in weather prediction [J]. *Science*, 2019, 363(6425): 342-344.
- [19] Air force snow and ice control program: AFI 32—1002 [S]. Washington, D.C.: Air Force Instruction, 2011.
- [20] Yang J, Yan Z G, Li X X, et al. A unified model and analytical solution for borehole and pile ground heat exchangers [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 152: 1-11.
- [21] Huang G Q, Yang X F, Liu Y J, et al. A novel truncated cone helix energy pile: modelling and investigations of thermal performance [J]. *Energy and Buildings*, 2018, 158: 1241-1256.
- [22] Cecinato F, Loveridge F A. Influences on the thermal efficiency of energy piles [J]. *Energy*, 2015, 82: 1021-1033.

(本文责编: 赵霞)