

## 传热管埋设方式对流体加热钢桥面除冰效果 影响数值模拟研究

马春堂<sup>1</sup>, 潘旭飞<sup>2</sup>, 张鹏<sup>1,\*</sup>, 宫玉辉<sup>1</sup>

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 青岛市勘察测绘研究院, 青岛 266033)

**摘要:** 基于三维仿真数值模拟方法, 构建了三维钢桥面除冰模型, 系统地研究了串、并联等 6 种埋管形式下钢桥桥面除冰效能规律, 并进一步研究了不同埋管形式在除冰过程中对钢桥桥面热应力变化的影响, 研究结果为流体加热钢桥面进行除冰融雪提供了参考。结果表明, 相较于下层串联埋管, 上层串联埋管具有更好的除冰及温升效果, 同时在快速除冰阶段会产生较大的热应力。在并联埋管形式中, 上层并联除冰及温升效果最好, 其引起的热应力也较大。双层交错埋管除冰效果较好, 引起的热应力较小。

**关键词:** 桥梁工程; 除冰融雪; 数值模拟; 埋管形式

中图分类号: U443.31 文献标志码: A 文章编号: 1673-4602(2026)01-0011-08

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4602.2026.01.002

## Numerical simulation study of the influence of heat transfer pipe burial method on the deicing effect of fluid-heated steel bridge decks

MA Chuntang<sup>1</sup>, PAN Xufei<sup>2</sup>, ZHANG Peng<sup>1,\*</sup>, GONG Yuhui<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Qingdao Institute of Surveying and Mapping, Qingdao 266033, China)

**Abstract:** Based on the three-dimensional simulation numerical simulation method, a three-dimensional steel bridge deck deicing model was constructed to systematically study the deicing effectiveness of steel bridge decks under six buried pipe forms, such as tandem laying and parallel paving, and to further study the influence of different buried pipe forms on the thermal stress change of steel bridge decks during the deicing process. The results of the research could provide a reference for the deicing of fluid-heated steel bridge decks for melting snow. The results show that compared with the lower tandem pipe laying, the upper tandem pipe laying has better deicing and temperature rise effects, and at the same time generates higher thermal stress in the rapid deicing stage. Among the parallel paving forms, the upper parallel paving has the best deicing and temperature rise effects, and the thermal stress caused by it is also larger, while the double-layer staggered paving has better deicing effects and causes lower thermal stress.

收稿日期: 2024-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(42177167)

作者简介: 马春堂(1997—), 男, 山东聊城人。硕士, 研究方向为岩土工程。E-mail: 746011877@qq.com。

\* 通信作者: 张鹏(1985—), 男, 山东潍坊人。博士, 教授, 主要从事岩土工程、城市地下空间等方面的研究。  
E-mail: zhangpchn@qut.edu.cn。

**Key words:** bridge engineering; deicing and snow melting; numerical simulation; buried pipe form

桥梁是公路交通的咽喉,在道路交通体系中占据着举足轻重的地位。冬季降温时,桥梁面板由表面和底部共同散热,桥梁面板的温度往往比路面更低,从而更容易出现结冰现象,更易造成交通事故和交通堵塞<sup>[1]</sup>。据统计,中国冬季有超过七成的公路不可避免地受到冰雪天气的严重影响<sup>[2]</sup>,每年导致数百起严重的交通事故,给社会带来了巨大的人员伤亡和经济损失。这些事故的主要原因在于,当公路表面覆盖积雪或结冰时,车辆轮胎与路面之间的附着力急剧减弱,附着系数显著降低,降幅高达 60%~75%,容易导致车辆打滑、偏移,并且增加制动距离,给行车安全带来较大影响。因此,研究道路融雪化冰成为一种必然趋势。

目前虽有人工法、机械法、融雪剂法、发热线通电升温法、红外热辐射加热法以及液体循环换热法等多种技术用于除冰融雪<sup>[3-4]</sup>,但每种方法都有其弊端。人工法依赖于人工使用工具或材料来清除冰雪,效率较低;机械法设备购置和维护费用昂贵<sup>[5]</sup>;融雪剂法会对桥梁、道路和植被造成腐蚀和损害,且可能对环境产生负面影响<sup>[6-7]</sup>;发热线及红外法耗电量极大,运营成本高昂<sup>[8]</sup>;液体循环换热技术利用能量桩提取浅层地温能,是一种主动、绿色、高效的新型路面融冰雪技术<sup>[9]</sup>,有利于保障我国生态文明建设的顺利实施,为实现“碳达峰、碳中和”做出贡献。

在液体循环换热桥面除冰融雪技术领域,相关学者已经展开了广泛而深入的研究。MIRZANAMADI 等<sup>[10]</sup>通过二维数值模型,深入研究了埋管换热系统中管道埋设深度和埋管间距对抗冰冻路面性能的具体影响;王艳庆等<sup>[11]</sup>聚焦于埋管液体循环换热系统在桥面融雪应用中的效能评估,发现随着管道间距的增加,桥面融雪的效果呈现出下降趋势;胡文举等<sup>[12]</sup>进一步利用有限元模拟方法,对桥面热流密度的分布进行分析,研究结果表明,随着埋管深度的增加,桥面热流密度的分布不均匀性得到了显著改善;LIU 等<sup>[13]</sup>在一项跨地域的研究中,对比了加拿大 6 座城市中流体循环换热法与电力发热线法在经济效益方面的表现,研究发现,前者在成本节约和环保效益上展现出了明显的优势;KONG 等<sup>[14]</sup>则通过现场试验验证了能量桩供热在桥面融雪中的有效性。此外,陈鑫等<sup>[9]</sup>也对桥面铺装层及桥面板底部埋设换热管 2 种方式进行了除冰现场试验,为实际应用提供了重要参考。这些研究不仅推动了能量桩液体循环换热桥面除冰融雪技术的发展,也为未来的应用提供了坚实的理论基础和实践指导。

国内外学者对基于能量桩的液体循环换热技术的研究主要集中在管距、管径、流速、埋深以及单层串联埋管等方面,对并联埋管以及双层埋管形式的研究相对较少。为此,本文利用 COMSOL 有限元分析软件建立了基于串、并联单、双层埋管的数值计算模型,研究了不同埋管形式下桥面除冰融雪效果、沥青混凝土层温度以及结构应力变化规律,并对比分析了不同埋管形式对结构的影响程度,以期促进液体循环换热桥面除冰融雪技术的发展。

## 1 模型构建

### 1.1 模型参数

本文采用 COMSOL 有限元分析软件,建立三维钢桥面除冰数值模型,模拟桥面加热过程中温度场及应力变化情况。在本研究中,分别建立了上、下层串联,上、下层并联,双层平行,双层交错 6 种结构形式,桥面结构及热物性参数如表 1、表 2 所示。

### 1.2 基本假定

1) 桥面由钢板层、沥青混凝土层及保温材料层构成,均视为各向同性材料。为简化分析,忽略流体加热对内部水泥混凝土产生的水化热效应,并假定所有材料的热力学参数在温度变化范围内保持不变。此外,假定路面结构的各层之间紧密贴合,不存在影响热传递的间隙或障碍。

2) 在热量传递的分析中,考虑管道内部流体沿流动路径发生的热量损失。

3) 管道全段截面均匀,且内部流动的水作为载热流体,具有不可压缩性,流速在管道内基本维持恒定。

4) 模型边缘及底部热绝缘良好,而顶部则开放于外界,允许发生热交换(如辐射、对流)。同时为简化计算,未考虑融化过程中蒸发冷凝的能量影响,且假定融化的雪水不渗透桥面钢板层。

5) 干雪或冰被视为具有一致且均匀的热传导能力<sup>[15]</sup>。

表 1 钢桥面板结构参数

结构参数	取值
桥面板尺寸(长×宽×高)/m	1.0×12.0×0.02
沥青混凝土厚度/cm	4.0
冰层厚度/cm	3.0
管内径/cm	2.0
管外径/cm	2.4
管距/cm	18

表 2 钢桥面板热物性参数

参数	沥青混凝土取值	钢板取值
导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	1.03	48
泊松比	0.35	0.29
热膨胀系数/10 <sup>-5</sup> K <sup>-1</sup>	2.56	1.22
杨氏模量/GPa	1.20	200
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2100	7870
比热容/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	1680	440

### 1.3 网格划分及模型验证

#### 1.3.1 网格独立性验证

为了验证模拟的准确性,本文对双层平行埋管模型进行了网格独立性测试,包含了从 6934 个到 483 725 个网格单元的 4 种不同网格设置。通过表 3 所列的除冰相变模拟结果,对比了不同网格密度下的模拟精度和计算效率。在综合考虑模拟精度和计算时间后,本文确定了采用包含 124 755 个网格单元的划分方案作为研究的基础。这一选择不仅确保了模拟结果的准确性,同时也兼顾了计算效率,从而证明了所选网格的独立性和适用性。

如图 1 所示,在网格划分策略上,选用户控制的自定义网格。为了保证计算准确性,针对路面结构内部复杂的热交换特性,本文采用了从内至外逐渐稀疏的网格布局原则。具体而言,管内流体区域设定为极细化的网格,以确保对流体流动及热量传输的精确模拟;而路面其余部分及冰雪层则采用了较细化的自由四面体网格。

#### 1.3.2 模型验证

为了验证本研究在模拟和分析中的精确性,对陈文举<sup>[16]</sup>所提供的温度及应力模拟数据进行了对比验证。通过图 2 的结果可以清晰地看出,在采用相同参数进行建模和数值模拟计算后,本研究所得的结果与陈文举的模拟数据之间的差异微乎其微,二者展现出了高度的吻合性。这一对比验证过程不仅证实了本文所采用的数值模拟方法的有效性和可靠性,也进一步证明了本研究工作的高精度特性。

## 2 不同管道埋设方式对融雪效果的影响

### 2.1 串联埋管对融雪效果的影响

为直接地反映系统的除冰效果,本文采用无雪率  $V_r$  表征桥面除冰效果,无雪率代表桥面板顶部有效融雪面积的比例,其计算公式如下式所示:

表 3 网格独立性验证

网格数/个	相变完成时间/h	计算时间/min
6 934	2.4	3
20 403	2.3	8
124 755	2.2	17
483 725	2.2	212

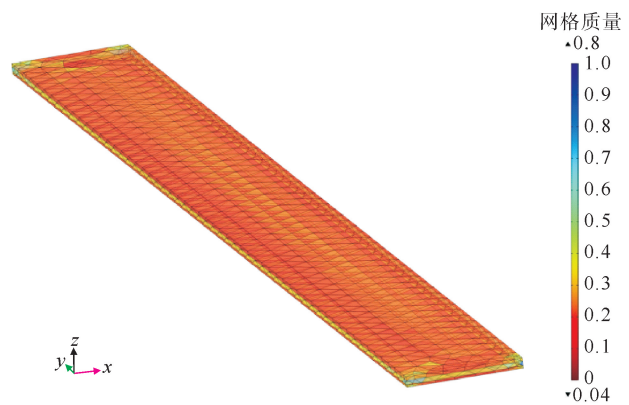


图 1 网格划分

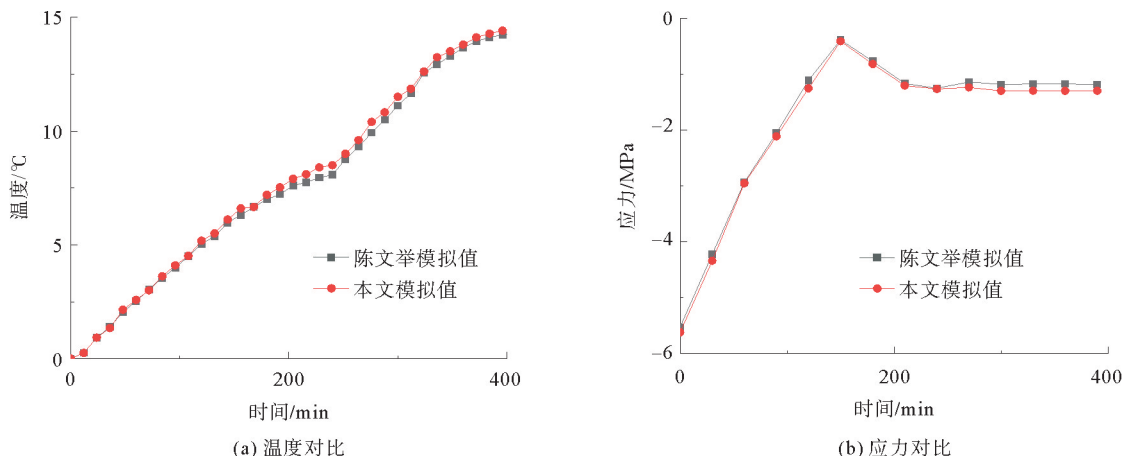


图 2 数值模拟结果对比

$$V_r = \frac{V_f}{V_i}$$

式中： $V_f$  为路面已融化冰雪的体积； $V_i$  为整个道路结构的初始冰雪体积。

图 3 与图 4 分别为除冰过程中相变云图与上层、下层串联埋管桥面无雪率随时间变化规律。在相同条件下，上层埋管与下层埋管时桥面除冰规律基本一致，除冰过程分为 3 个阶段，首先是预热阶段，然后是快速除冰阶段，最后是缓慢除冰阶段。循环开始时，热量主要用于加热桥面结构，而后热量主要用于相变，冰层融化速率较快，随着融化过程的进行，融化过程的热量一部分被水相吸收，因而融化速率相较于快速除冰阶段减慢。由图 4 可知，0.1~0.5 h 为快速除冰阶段，上层埋管除冰优势更加明显。无雪率差距在 0.3 h 时达到最大，最大为 0.2，这是由于下层埋管需要首先预热钢板，传热距离长，需要更长的预热时间。由此可见，上层埋管除冰效果更好，下层埋管在预热条件下，同样能够拥有较好的融雪效果。

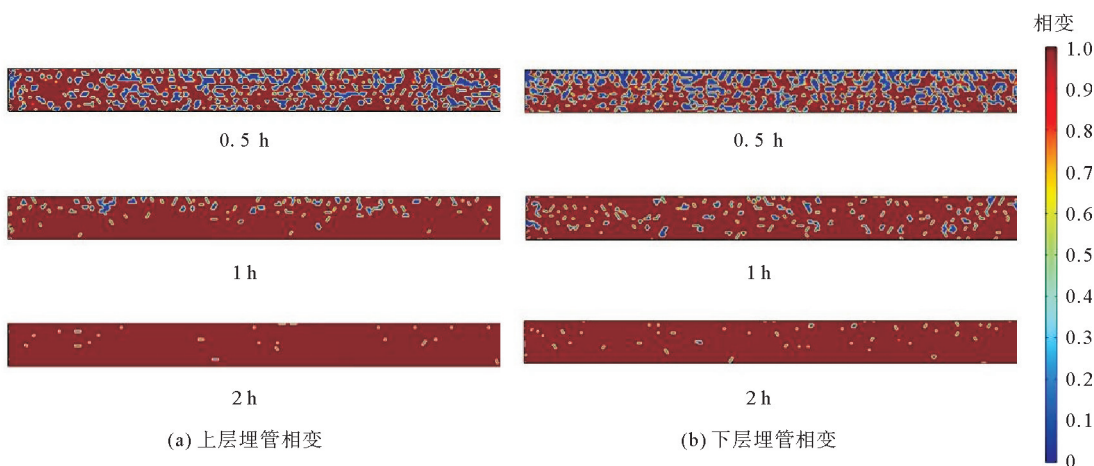


图 3 相变云图

图 5 为上层与下层埋管在除冰过程中沥青混凝土表层温度随时间变化规律。除冰过程中，沥青混凝土表层温度随时间变化不断升高，前期热量主要用于结构层温升，因而温升速率较快，然后热量用于除冰相变吸热，温升速率逐渐降低。从图中可以看出，上层埋管沥青混凝土表层温度始终高于下层埋管，且温差逐渐增大，2 h 时温差为 0.8 °C。这是因为下层埋管传热路径较长，热量损失较多。由此可见，上层埋管温升更快，热效应更加明显。

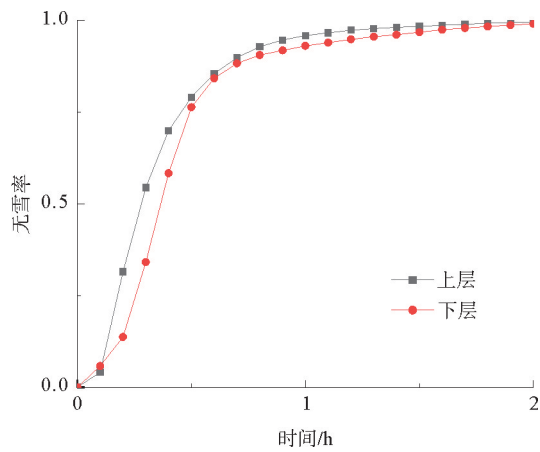


图 4 串联埋管无雪率

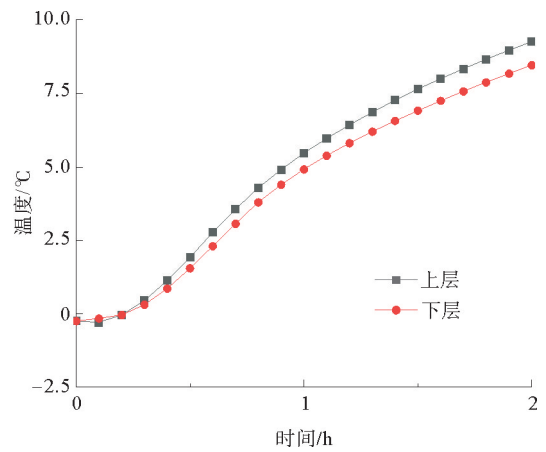


图 5 串联埋管沥青混凝土表层温度

### 2.2 并联埋管对融雪效果的影响

图 6 为并联埋管桥面无雪率随时间变化规律。上层并联埋管除冰优势较为明显,在 0.8 h 时完成除冰;双层交错埋管与双层平行埋管次之,分别在 1、1.2 h 完成除冰;下层并联埋管除冰效果最差,在 1.6 h 时完成除冰;其中双层平行埋管与双层交错埋管在快速除冰阶段除冰效果差距较小,在缓慢除冰阶段双层交错埋管比双层平行埋管更有优势。由此可见,除冰效果与传热路径的长短有关,上层并联埋管传热路径更短,除冰效果更好。

图 7 为并联埋管在除冰过程中沥青混凝土表层温度随时间变化规律。其中,上层并联埋管沥青混凝土表层温度最高,0.4 h 后其温度高于双层平行埋管与双层交错埋管,差距随时间变化也越来越大,在 0.7 h 时与双层平行埋管温差最大,为 1.7 °C,然后温差稳定在 1.5 °C;双层平行埋管与双层交错埋管表层温度始终高于下层并联埋管,其温差不断变大,在 1.5 h 达到最大,为 1.251 °C,之后稳定在 1.215 °C;上层并联埋管与下层并联埋管温差持续增大,在 2 h 温差达到最大,为 2.3 °C。由此可见,上层并联与双层交错埋管传热效果较好,双层埋管由于下层设有保温层,热量只向上传递,产生热堆积现象,具有更好的蓄热能力。

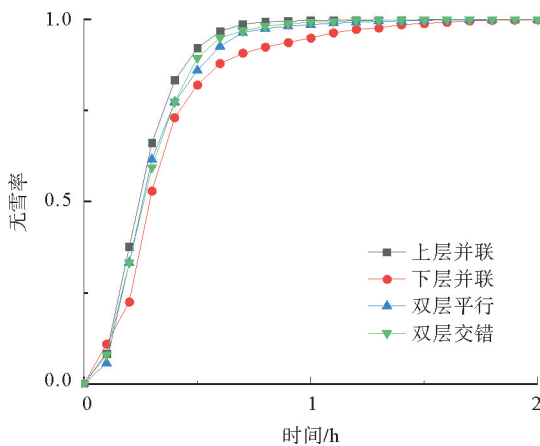


图 6 并联埋管无雪率

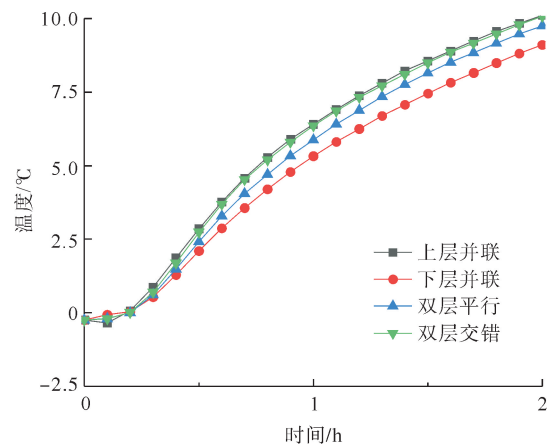


图 7 并联埋管沥青混凝土表层温度

### 3 桥面板结构热响应

#### 3.1 串联埋管结构热响应

图 8 为上、下层埋管出入口应力云图。由图中可以看出,应力较大处主要集中在出入口附近钢板边缘处,且入口处应力更大,这是由于循环管入口与出口分别为温度最高与最低处,温度梯度较大,引起的温度应力也较大。

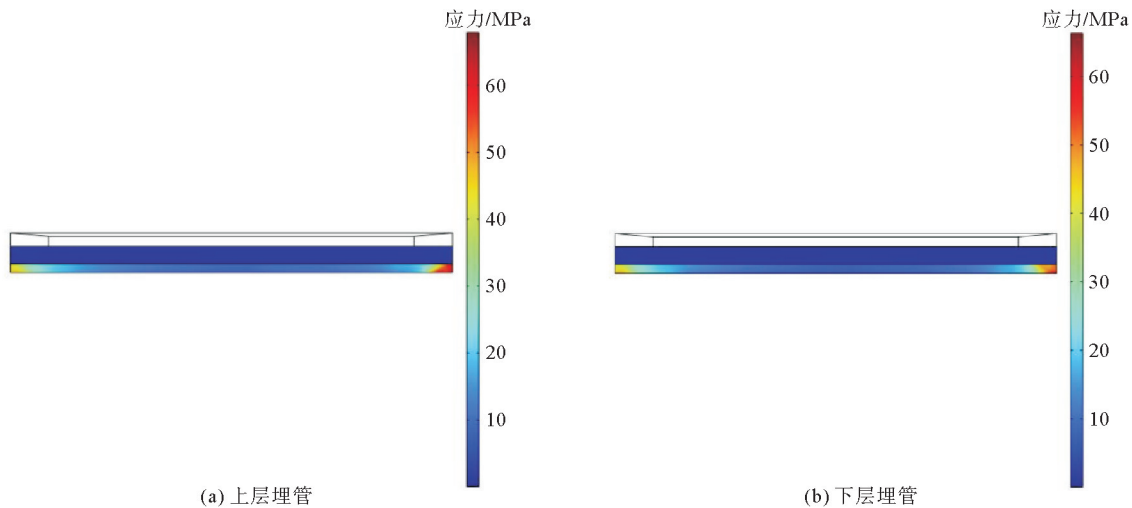


图 8 应力云图

图 9 与图 10 分别为串联埋管除冰过程中钢板层与沥青混凝土层应力变化规律。除冰过程中结构热应力逐渐降低,除冰开始时,由于结构受热不均,产生了较大的热应力,随着热量的传递,结构热应力逐渐降低。由图可知,下层埋管结构应力变化更加明显,在快速除冰阶段其应力降低速率更大,上层埋管与下层埋管热应力差距随着除冰进行先增大后减小,沥青混凝土层应力差距在 0.3 h 最大,为 0.08 MPa。钢板层应力差距在 0.5 h 最大,为 24.55 MPa。由此可见,上层埋管与下层埋管相比,会使结构产生较大的热应力,这种差距在钢板层表现得更加明显。

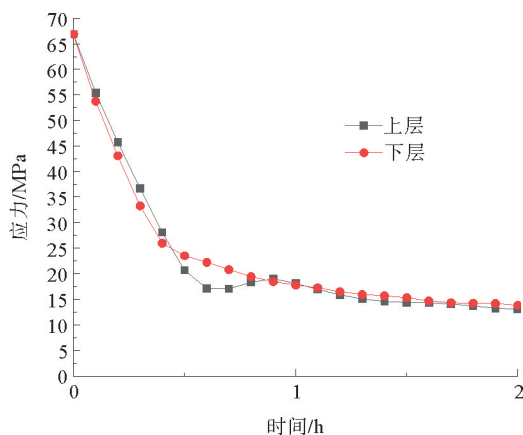


图 9 串联埋管钢板层应力

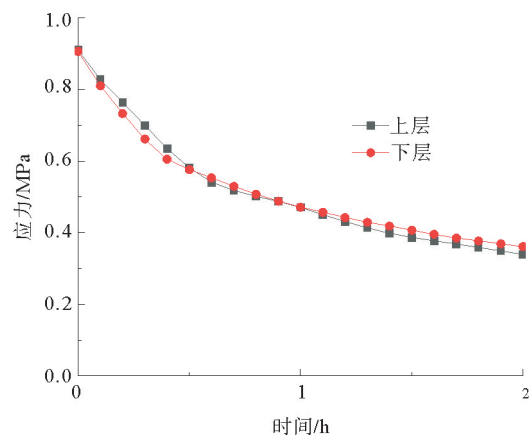


图 10 串联埋管沥青混凝土层应力

#### 3.2 并联埋管结构热响应

图 11 与图 12 分别为并联埋管除冰过程中钢板层应力与沥青混凝土层应力变化规律。循环开始时结构受热不均,温度梯度较大,引起较大的结构应力,钢板层应力约为 67 MPa,沥青混凝土层应力约为

1 MPa。随着热量传递,温度梯度降低,二者应力都随时间不断降低,2 h 时钢板层应力约为 10~13 MPa,沥青混凝土层应力约为 0.3 MPa。由图中可知,0.3 h 前上层并联埋管引起的钢板层应力最大,双层平行埋管最小;0.3 h 后下层并联引起的应力最大,双层交错引起的应力最小。沥青混凝土层在 0.7 h 也表现出了同样的特征,这是由于传热路径较长,相较于钢板层应力变化有滞后性。此外,双层交错埋管引起的结构应力最小,说明其传热更加均匀,引起的温度梯度更小。由此可见,双层交错埋管在除冰与结构热应力方面都有较好的效果。

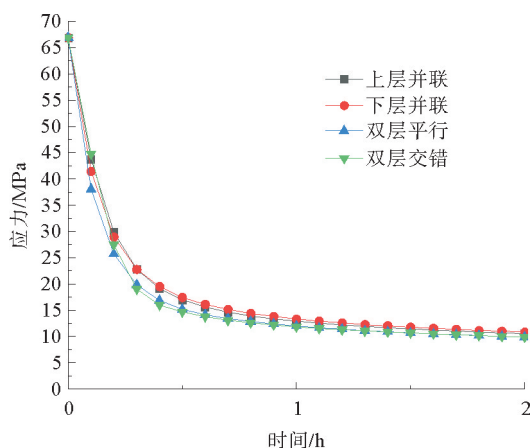


图 11 并联埋管钢板层应力

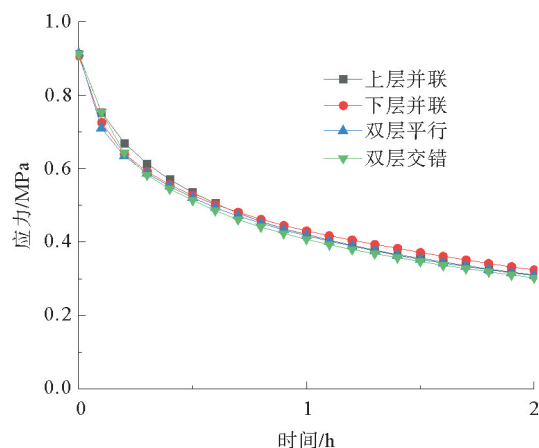


图 12 并联埋管沥青混凝土层应力

## 4 结论

1) 串联埋管条件下,上层埋管相对于下层埋管具有更好的除冰效果,上层埋管沥青混凝土层温度更高。在快速除冰阶段,上层埋管热应力较大;在缓慢除冰阶段,下层埋管热应力更大。

2) 并联埋管条件下,上层并联埋管较其他埋管方式除冰效果最好,其次为双层交错、双层平行、下层并联埋管;上层并联与双层交错埋管较其他埋管形式沥青混凝土层温度更高,其次为双层平行、下层并联埋管。在快速除冰阶段,上层并联埋管引起的结构热应力最大,其次是下层并联、双层交错、双层平行;在缓慢除冰阶段,下层并联埋管引起的结构热应力最大,其次是上层并联、双层平行、双层交错埋管。

3) 在不同的除冰阶段和埋管方式下,结构温度场与热应力的分布和大小有所不同。今后在设计 and 实施除冰系统考虑这些变化的同时,还应考虑车辆荷载对管道结构受力的影响,以优化系统性能并确保结构安全。

### 参考文献 (References):

- [1] 陈鑫,孔纲强,王忠涛,等. 能量桩桥面除冰融雪的能源需求与供给能力案例分析[J]. 中国公路学报,2023,36(3):202-210.  
CHEN Xin,KONG Gangqiang,WANG Zhongtao,et al. Case studies on energy demand and capacity of bridge deck deicing and snow melting technology based on energy piles[J]. China Journal of Highway and Transport,2023,36(3):202-210.
- [2] 徐慧宁,谭忆秋,周纯秀,等. 太阳能-土壤源热能耦合桥面融雪系统温度分布特性的研究[J]. 太阳能学报,2012,33(11):1920-1925.  
XU Huining,TAN Yiqiu,ZHOU Chunxiu,et al. Temperature distribution characteristic in solar-ground source coupled snow-melting system for bridge deck[J]. Acta Energetica Solaris Sinica,2012,33(11):1920-1925.
- [3] WÄHLIN J,LEISINGER S,KLEIN-PASTE A. The effect of sodium chloride solution on the hardness of compacted snow[J]. Cold Regions Science and Technology,2014,102:1-7.
- [4] 谭忆秋,张弛,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.

- [5] 田晋跃. 国外道路除雪机械技术发展概况[J]. 专用汽车, 2001(4): 43-44.  
TIAN Jinyue. Overview of the development of foreign road snow removal machinery technology[J]. Special Purpose Vehicle, 2001(4): 43-44.
- [6] 洪乃丰. 再议“盐害”与融雪剂[J]. 城市与减灾, 2003(1): 29-32.  
HONG Naifeng. Talking again about disaster of salt and snow-melting agent[J]. Cities and Disaster Reduction, 2003(1): 29-32.
- [7] 红霞. 融雪剂对环境的影响及对策[J]. 中国高新技术企业, 2013(32): 83-84.  
HONG Xia. Impact of snowmelt on the environment and countermeasures[J]. China High-Tech Enterprises, 2013(32): 83-84.
- [8] SIVASAKTHIVEL T, MURUGESAN K, SAHOO P K. A study on energy and CO<sub>2</sub> saving potential of ground source heat pump system in India[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 32: 278-293.
- [9] 陈鑫, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 换热管埋设位置对桥面板除冰效果影响现场试验[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(5): 888-896.  
CHEN Xin, KONG Gangqiang, LIU Hanlong, et al. Field test on the influence of the embedding position of heat exchanger pipes on the deicing performance of the bridge deck[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(5): 888-896.
- [10] MIRZANAMADI R, HAGENTOFT C E, JOHANSSON P, et al. Anti-icing of road surfaces using hydronic heating pavement with low temperature[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 145: 106-118.
- [11] 王庆艳, 李维仲. 太阳能-土壤蓄热融雪系统融雪机理的研究[J]. 太阳能学报, 2008, 29(11): 1385-1389.  
WANG Qingyan, LI Weizhong. Research on snow-melting mechanism in solar-heat storage in soil snow-melting systems[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2008, 29(11): 1385-1389.
- [12] 胡文举, 姜益强, 姚杨, 等. 桥面热力融雪模型研究与分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(12): 1895-1899.  
HU Wenju, JIANG Yiqiang, YAO Yang, et al. Study on the snow-melting model based on hydronic heating for bridge deck[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(12): 1895-1899.
- [13] 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.
- [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, 2019, 43(1): 596-603.
- [15] 吕伟东. 深层埋管式能源桩用于桥面融雪的热力耦合特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.  
LV Weidong. Study on thermal-mechanical coupling characteristics of deeply penetrating energy piles used for bridge deck snow melting[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [16] 陈文举. 流体加热桥面融雪化冰性能三维数值模拟与分析[D]. 济南: 山东大学, 2023.  
CHEN Wenju. Three-dimensional numerical simulation and analysis of snow and ice melting performance of fluid-heated bridge deck[D]. Jinan: Jinan University, 2023.

(责任编辑 张晓靖; 英文校审 程文华)