

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220616006

## 换热管埋设位置对桥面板除冰效果 影响现场试验\*

陈鑫<sup>1</sup>, 孔纲强<sup>2</sup>, 刘汉龙<sup>3</sup>, 江强<sup>4</sup>

(1. 江苏开放大学建筑工程学院, 江苏南京 210036; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400044; 4. 江阴市城市重点项目建设管理中心, 江苏江阴 214400)

**摘要:** 管埋式液体循环换热桥面除冰融雪技术可以利用浅层地温能、太阳能等可再生能源, 是一种节能环保的新型融雪方式。依托江阴市征存路观风桥市政桥梁工程, 针对在桥面板铺装层或桥面板底部埋设换热管两种埋管方式, 开展桥面工程除冰现场试验。在桥面铺设冰层, 分别通过铺装层换热管和底部换热管与桥面板进行换热, 并通过参照试验消除外部环境对试验结果的影响。实测两种埋管位置循环换热作用下, 桥面的除冰效果和桥面板的温度变化规律; 初步对比分析两种埋管位置除冰系统的热效率(用于除冰的热量与系统提供的总热量的比值), 及桥面板的热-力响应特性。结果表明: 现场试验条件下, 铺装层埋管除冰系统运行8小时后, 系统的热效率约42%, 8小时内平均热效率约25%; 底部埋管桥面除冰系统的平均热效率约为铺装层内埋管桥面除冰系统的50%; 在相同的热交换功率下, 底部换热管除冰系统流体温度远高于铺装层换热管除冰系统, 底部换热引起的桥面板底部混凝土最高温升为31℃, 相应温度应力为2.78 MPa, 约为混凝土抗压强度(19.1 MPa)的14.5%。为了达到相同的融冰效果, 底部换热系统需提供更高的换热功率和流体温度, 并在混凝土内部引起更大的温度应力。

**关键词:** 桥梁工程; 除冰融雪; 现场试验; 换热管; 埋管位置; 温度应力

**中图分类号:** U441.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)05-0888-09

## Field Test on the Influence of the Embedding Position of Heat Exchanger Pipes on the Deicing Performance of the Bridge Deck

CHEN Xin<sup>1</sup>, KONG Gangqiang<sup>2</sup>, LIU Hanlong<sup>3</sup>, JIANG Qiang<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Jiangsu Open University, Nanjing 210036, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 4. Jiangyin Management Center of Urban Major Construction Projects, Jiangyin 214400, China)

**Abstract:** The deicing and snow melting technology of the hydraulic heat exchange bridge deck can make use of shallow geothermal energy, solar energy, and other renewable energy, which is a new way of energy-saving and environment-friendly snow melting. Based on the municipal bridge project of Guanfeng Bridge in Jiangyin city, field tests on the deicing system of the bridge deck were carried out considering two buried pipe positions, namely, the deck pavement layer and the bottom of the bridge deck. The ice layer was laid on the bridge deck surface, and the bridge deck was heated by the heat ex-

\* 收稿日期: 2022-06-16; 修回日期: 2022-08-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51778212)资助

作者简介: 陈鑫(1986—), 女, 博士研究生。主要从事能量桩技术相关研究。E-mail: xinchen0114@163.com

change pipes of the pavement layer or the heat exchange pipes of the bottom. The influences of the external environment on the test results were eliminated by referring tests. The effect of these two buried pipe positions on the deicing effect of the bridge deck and the temperature variation trend of the bridge deck was measured. The thermal efficiency (the ratio of the heat used for deicing to the total heat provided by the system) of these two systems and the thermal-mechanical response characteristics of the bridge deck were compared and analyzed. The research results indicate that the thermal efficiency of the deicing system with a buried pipe in the pavement layer reached 42% after heating for 8 hours. The average thermal efficiency over 8 hours was 25%. The thermal efficiency of the deicing system with a buried pipe at the bottom was approximately 50% of that of the deicing system with a buried pipe in the pavement layer. Under the same heat exchange power level, the fluid temperature of the bottom heat exchange pipe deicing system is much higher than that of the pavement layer heat exchange pipe deicing system. The maximum temperature rise at the bottom of the bridge deck due to the heating effect of the bottom heat exchange pipe was 31°C, and the corresponding thermally induced stress reached 2.78 MPa, accounting for 14.5% of the compressive strength of concrete (19.1 MPa). To achieve the same melting effect, the bottom heat exchange system needs to provide higher heat exchange power and fluid temperature and cause greater thermal stress in the concrete.

**Keywords:** bridge engineering; ice removal; field test; heat exchangers-tubes; buried pipe position; thermal stress

## 引 言

冬季气温降至0℃以下,桥面易结冰,导致交通事故频发,造成人民生命财产损失严重。由于化学融雪剂易腐蚀桥面结构,污染环境;机械除雪易损坏结构,国内外学者展开了对新型桥面除冰融雪技术的研究。新型桥面除冰融雪方式主要包括在面板中埋设发热线通电升温法<sup>[1-3]</sup>、埋置热力管流体循环换热法<sup>[4-6]</sup>、以及红外热辐射加热法等<sup>[7-8]</sup>;其中,埋置热力管流体循环换热法是将换热管埋设在桥面板中,利用热流体在换热管中循环,加热桥面板进行除冰融雪<sup>[9]</sup>。该技术可利用能量桩(在桩基础中预埋换热管)提取浅层地温能,具有节能环保等技术优势,逐步被广大工程技术人员关注。夏季高温时期,液体在换热管内循环可降低路面温度,不仅提高沥青路面的抗车辙能力,而且实现热能存储。

关于埋管式液体循环换热桥面除冰融雪技术,相关学者已经开展了一些研究工作。R. Mirzamanadi等<sup>[10]</sup>建立二维数值模型研究埋管深度、间距等因素对埋管换热路面抗冰冻性能的影响;王艳庆等<sup>[11]</sup>通过数值模拟分析埋管液体循环换热系统融雪过程,得到桥面融雪效果随着管间距的增大而降低;胡文举等<sup>[12]</sup>利用有限元模拟分析得到桥面热流密

度分布不均匀性随着埋管深度增加而减小;H.W. Liu等<sup>[13]</sup>通过数值模拟研究能量桩桥面除冰系统在加拿大六座城市应用的可行性,结果表明,使用地热能的热力管流体循环换热法比基于电力的发热线通电升温法具有更高的经济效益;G.Q.Kong等<sup>[14]</sup>开展能量桩桥面融雪现场试验,得到能量桩供热可有效融化桥面积雪。

然而,桥面板吸收的热量并不能完全用于除冰融雪,仅传递至面板表面的热量可用于除冰融雪;用于除冰的热功率与系统提供的总热功率的比值被认为是系统的热效率。热效率为预测系统除冰融雪所需换热功率的重要参数,I.H.Ho等<sup>[15]</sup>在研究中假设埋管换热桥面除冰系统的热效率为75%;张登春等<sup>[16]</sup>开展室内模型试验研究热力管加热桥面板融冰的热效率,得到换热管底部未设隔热材料条件下,热效率约13%~18%,换热管底部设置隔热材料时,热效率可提高至47%~52%。对于新建桥梁,换热管可以埋设在距离桥面板表面相对较近的铺装层;对于既有桥梁,换热管一般埋设在桥面板底部。X.B.Yu等<sup>[17]</sup>基于模型试验,研究了面板底部安装换热管桥面的除冰效果,但是模型面板只有10 cm厚,与实际桥梁面板差别较大;O.Habibzadeh等<sup>[18]</sup>在美国德克萨斯州开展桥面板底部加热系统桥面除冰试验研究,试验桥面板为20 cm厚的预应

力混凝土板;T. Li等<sup>[19]</sup>通过数值模拟对比分析铺装层和底部埋设换热管液体循环作用下,桥面板的温度响应规律。然而,基于现场试验对两种埋管位置除冰系统的热效率与除冰效果的研究却很少。

为此,依托江阴市征存路观风桥市政桥梁工程,现场实测分析桥面板铺装层埋管和底部埋管桥面除冰系统的除冰效果及热效率变化规律,并监测桥面板的温度应变、应力;以期为基于能量桩的桥面工程埋管式液体循环除冰系统的设计与计算提供技术支撑。

## 1 现场试验概况

### 1.1 桥面板埋管布置

试验桥梁名为“观风桥”,位于江苏省江阴市,为空心板简支梁桥。桥面板厚80 cm,分别由60 cm预制混凝土空心板,10 cm现浇水泥混凝土层和10 cm沥青面层组成。换热管安装在图1(a)中的试验区域,面积为6.3 m<sup>2</sup>,铺管形式如图1(b)所示。换热管为外径20 mm、内径16 mm的聚乙烯升温管(PERT),换热管水平间距为25 cm。铺装层换热管绑扎在现浇混凝土层的钢筋网上,位于面板表面以下14 cm处;底部换热管安装在桥面板的底部,外侧

采用自粘式保温棉粘贴,以防热量从底部散失。换热管安装的现场照片如图1(c)、(d)所示。

图1(a)中的参照区域内桥面板铺装层和底部均无埋管,用于开展参照试验。参照区与试验区距离为2 m。两个温度-应变集成传感器A和B与换热管一同绑扎在钢筋网上;传感器A位于换热管旁边A点,用于监测试验期间桥面板在换热系统和外界环境条件双重作用下的温度与应变;传感器B位于参照试验区域,距离A点5 m(图1(a)),用于监测试验期间桥面板在外界环境条件下的温度与应变;传感器A的正下方桥面板底部安装温度传感器C和JTM-V5000F型振弦式表面应变计,用于监测试验过程中桥梁底部混凝土的温度与应变。

### 1.2 循环系统

循环系统由换热管、连接水管、保温水桶、水泵、流量计及温度计等组成。保温水桶具有电加热功能,功率为0~6 kW。保温水桶接进/出水口连接水管,在进/出水连接水管上安装水泵、流量计和温度计。连接水管与桥面板的换热管通过活动接头连接,连接水管用保温材料包裹,循环系统的布置如图1(b)所示。保温水桶内装满水,水泵驱动管内流体循环,流量计监测流率,温度计监测进/出口流体的温度。

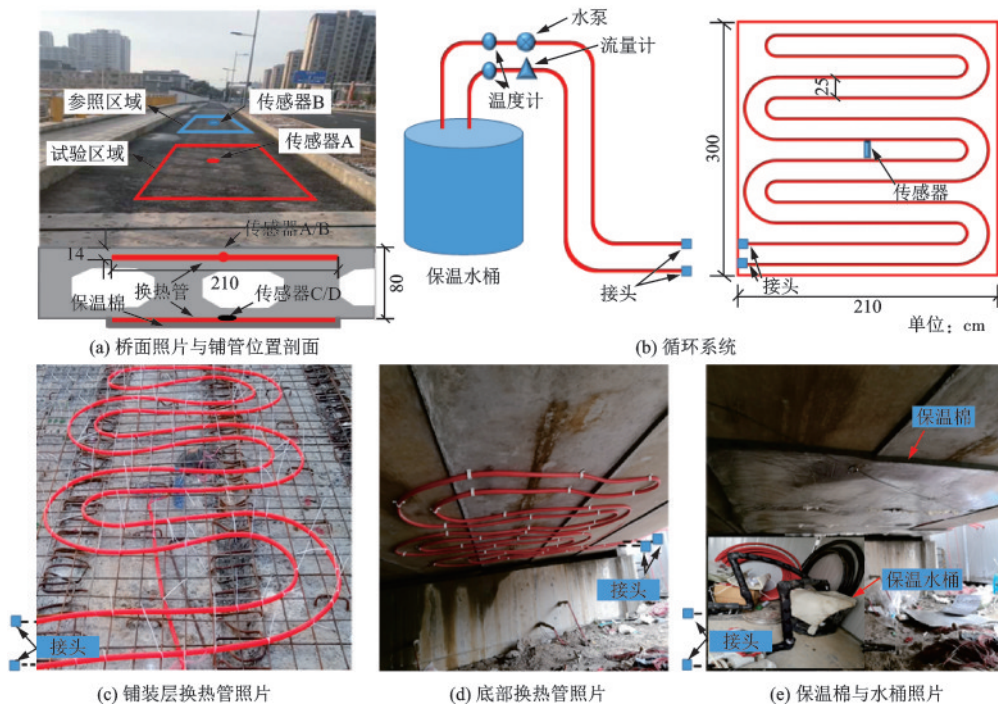


图1 桥面板换热管布置照片及示意图

Fig. 1 Photographs and schematic diagram of heat exchanger pipe arrangement of the bridge deck

### 1.3 试验方案与工况设计

#### (1) 铺装层换热管除冰试验

铺装层换热管除冰试验于2020年1月30日晚至2020年1月31日早上进行。试验前测得桥面温度为2.8℃,高于冰点温度;因此,需进行参照试验,以获得热循环系统融冰的质量。试验用冰为饮用水制成的冰块通过机器打碎而成,测得碎冰的密度为570 kg/m<sup>3</sup>。将埋管区域和参照区域分别用红色油漆标记(宽度为2.1 m,长度为3.0 m);于2020年1月30日23时,在两块区域分别均匀满铺36 kg碎冰,在桥面上形成1 cm厚的冰层;同时开启系统,流量为0.90 m<sup>3</sup>/h,保温水桶的加热功率为1.5 kW,即238 W/m<sup>2</sup>(换热面积为6.3 m<sup>2</sup>)。每小时记录一次进/出口水温,面板的温度和应变;试验8小时后,2020年1月31日7时关闭系统,同时将两块区域的余冰收入袋中称重。

#### (2) 底部换热管除冰试验

底部换热管除冰试验于2021年1月29日晚至2021年1月30日早上进行。底部换热管距表面80 cm,传热路径较长,在除冰试验之前对底部换热管进行了桥面板热响应测试,得到系统开启30小时以后,桥面的温度开始上升。因此,在桥面铺设冰层之前,提前32小时打开循环系统。2021年1月28日14时开启系统,流体流量为0.90 m<sup>3</sup>/h;加热功率为1.5 kW,即238 W/m<sup>2</sup>;同时记录进/出口水温,桥面板的温度与应变。2021年1月29日22时,在桥面板试验区域和参照区域分别均匀满铺36 kg碎冰,在桥面上形成1 cm厚的冰层;每小时记录一次面板表面冰层的融化状态、进/出口水温以及面板的温度与应变;1月30日6时将余冰收入袋中称重。

## 2 换热与传热分析

### 2.1 换热功率

循环系统的换热功率可根据公式(1)计算<sup>[14]</sup>:

$$q = \frac{mc_p(T_{in} - T_{out})}{A_{heated}} \quad (1)$$

式中, $q$ 为换热功率; $m$ 为试验中流体的质量流率,根据流量计的读数,按照流体密度换算得到; $c_p$ 为试验所用流体的比热容; $T_{in}$ 为进口流体温度; $T_{out}$ 为出口流体温度; $A_{heated}$ 为受热板的面积,根据图1所示的换热管的布置,其面积为6.3 m<sup>2</sup>。

试验使用的循环流体是饮用水,研究所用材料参数见表1。

表1 材料参数

参数	数值	单位
碎冰的密度, $\rho_{ice}$	570	kg/m <sup>3</sup>
水的密度, $\rho_{water}$	1 000	kg/m <sup>3</sup>
碎冰的比热容, $c_{p,ice}$	2 100	J/(kg·°C)
水的比热容, $c_{p,water}$	4 200	J/(kg·°C)
碎冰的融化热, $h_{if}$	335 000	J/kg
加热功率, $p$	238	W/m <sup>2</sup>
质量流率, $m$	0.25	kg/s
碎冰的初始温度, $T_i$	-3.0	°C
碎冰的融化温度, $T_{is}$	0	°C
桥面板混凝土的导热系数, $k$	1.6	W/(m·°C)
桥面板混凝土的杨氏模量, $E$	$2.5 \times 10^4$	MPa
桥面板混凝土的膨胀系数, $\beta$	$10^{-5}$	°C

### 2.2 传热分析

高温液体流经换热管时,将热量传递给换热管,并向周围混凝土传递;靠近换热管的混凝土吸热后升温,热量会继续向周围传递。铺装层换热管热循环过程中,热量主要向上、向下及四周传递;底部换热管循环过程中,热量主要向上和四周传递。只有传至桥面的热量才能用于除冰,定义为有效热功率 $q'$ ,如图2所示。

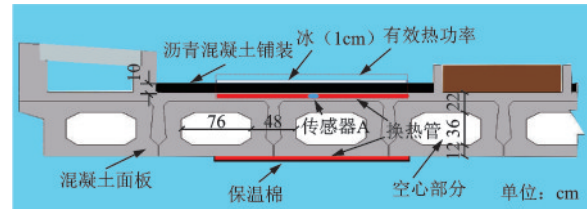


图2 桥面板及换热埋管位置剖面图

Fig. 2 Location profile of the bridge deck and buried heat exchange pipes

$q'$ 可以基于铺装埋管层(传感器A位置)与表面温度差,通过一维傅立叶热传导定律简化计算:

$$q' = k \frac{\Delta T}{\delta} \quad (2)$$

式中, $q'$ 为有效热功率; $\Delta T$ 为铺装埋管层与表面的温度差; $k$ 为混凝土的导热系数; $\delta$ 为铺装埋管层至表面的距离。

图3为一维傅立叶热传导定律分析图。

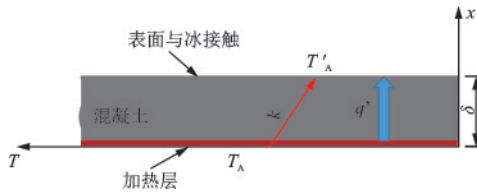


图3 有效热功率分析图

Fig. 3 Analysis diagram of effective thermal power

当面板温度高于 $0^{\circ}\text{C}$ 时,面板本身可以融冰,所以本文通过对比试验来确定系统的除冰效果。传感器A和B所测温度的差值 $T_A-T_B$ 可视为液体循环换热作用的结果;冰层与面板接触的位置的温度 $T'_A$ 和 $T'_B$ 认为是 $0^{\circ}\text{C}$ ;那么 $q'$ 可以通过式(3)计算:

$$q' = k \frac{(T_A - T_B) - T'_A}{\delta} \quad (3)$$

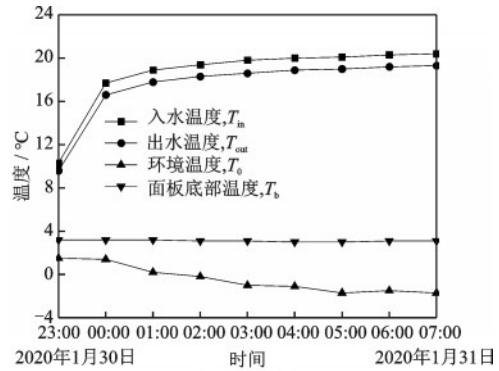
式中, $T_A$ 为传感器A测得的温度; $T_B$ 为传感器B测得的温度; $T'_A$ 为面板表面的温度。

### 3 现场试验结果与分析

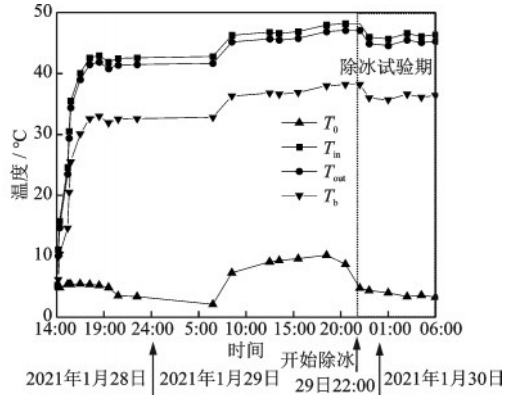
#### 3.1 换热功率

铺装层换热管除冰试验过程中进/出口水温和环境温度如图4(a)所示。在试验过程中,环境温度从 $1.5^{\circ}\text{C}$ 降至 $-1.7^{\circ}\text{C}$ ;进/出口水温在系统开启的第一个小时内迅速上升,之后保持相对稳定,略有上升;进、出口水温差保持 $1.1^{\circ}\text{C}$ 不变。根据式(1)计算得到换热功率为 $183.3 \text{ W}/\text{m}^2$ ,小于 $238 \text{ W}/\text{m}^2$ 的加热功率;因为即使做了保温措施,仍然有部分热量通过水箱及连接管道散失。试验过程中,环境温度不断降低,但是面板底部的温度缓慢升高。说明铺装层换热管进行桥面板换热时,热量可传递至面板底部,并从底部散失。因此,底部设置保温材料是非常必要的。

底部管换热试验提前32小时开启系统,试验过程中进/出口水温和环境温度如图4(b)所示。系统开启后5个小时以内,液体温度迅速上升至 $40^{\circ}\text{C}$ 左右,之后保持基本稳定,随着环境温度的变化而周期性波动。白天环境温度升高,桥面板散热减缓,桥面板温度升高,流体温度随之升高;夜间环境温度降低,桥面散热加快,桥面板和流体的温度降低。除冰试验过程中,环境温度从 $5^{\circ}\text{C}$ 降至 $2^{\circ}\text{C}$ ,进、出口水温差保持 $1.1^{\circ}\text{C}$ 不变,换热功率保持为常数( $183.3 \text{ W}/\text{m}^2$ )。桥面板底部的温度随着流体温度的升高而迅速升高,并于流体温度保持相同的变化



(a) 铺装层换热管试验



(b) 底部换热管试验

图4 桥面板进/出口水温与时间关系曲线

Fig. 4 Water temperatures at the inlet/outlet of bridge deck with time

趋势,二者始终保持约 $10^{\circ}\text{C}$ 的温度差。研究表明,流体与面板的温度差与换热功率成线性关系<sup>[20]</sup>。

在相同的加热功率下,铺装层换热管和底部换热管的换热功率相同,但流体温度差别较大。铺装层换热管预埋在混凝土内部,系统运行时,高温流体流经换热管,与管周混凝土产生热交换,热量被管周混凝土吸收,并向周围传递,如图5(a)所示。底部换热管仅管顶与混凝土面板接触,管外侧则被保温棉包裹,管道之间为封闭的空气。热量仅通过

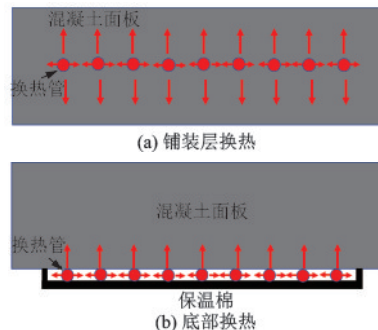


图5 桥面板换热分析图

Fig. 5 Heat transfer analysis diagram of the bridge deck

管顶混凝土向上传递,热传递方向单一,如图5(b)所示;在相同的换热功率下,热量不能及时被混凝土吸收,导致管内流体及混凝土板底部温度大幅度升高;当混凝土内部的温度梯度满足换热功率的热传导要求时,流体温度达到稳定。因此,底部换热管内流体温度远高于铺装层换热管内流体的温度。可以得到,要实现底部换热管与铺装层换热管具有相同的换热功率,底部换热管内流体必须具备更高的温度。笔者等<sup>[20]</sup>对桥面板展开多组不同加热功率的热响应试验,得到在相同的换热功率下,底部换热管内流体温度是铺装层换热管内流体温度的2.3倍。

### 3.2 融冰结果与分析

图6为铺装层换热管除冰试验开始后不同时间桥面融冰情况;图6(a)为除冰试验开始时桥面的情况。在试验开始时,面板和环境的温度分别为2.8℃和1.5℃;因此,在试验开始时,试验区域和参照区域均发生融冰。从照片中冰层旁边的水流面积可以看出,在整个试验过程中,试验区域的冰层一直在快速融化;参照区域仅在前期有部分融冰,试验开始5小时后,即31日凌晨4时基本停止融化。

试验结束后,将两块区域的余冰收入袋中称重,试验区域和参照区域的余冰质量分别为8.75 kg和32.9 kg;参照区域的冰在外部自然环境下融化了3.1 kg,试验区域的冰在自然环境和热循环双重作用下融化了27.25 kg;两者之间的差值为热循环作用下融冰的质量,为24.15 kg。

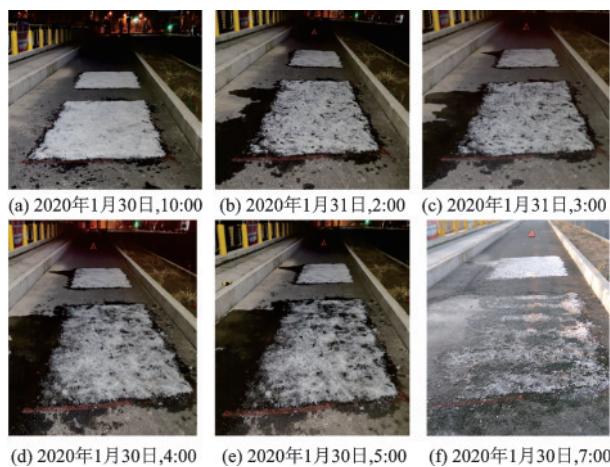


图6 铺装层埋管形式下桥面融冰过程照片

Fig. 6 Photographs of ice melting process of the hydraulic bridge deck with heat exchange pipes buried in the pavement layer

图7为底部换热管除冰试验开始后不同时间桥面融冰情况;图7(a)为除冰试验开始时桥面的情况。由于环境温度较高,在试验过程中,两个区域的冰层均融化;试验结束时,两个区域的冰均未完全融化。1月30日6时试验结束后将余冰收入袋中称重,其中试验区域和参照区域余冰质量分别为13.7 kg和25.7 kg;参照区域的冰层在外部自然环境下融化了10.3 kg,试验区域的冰层在自然环境和热循环双重作用下融化了22.3 kg;即底部换热管热循环作用融冰12.0 kg。

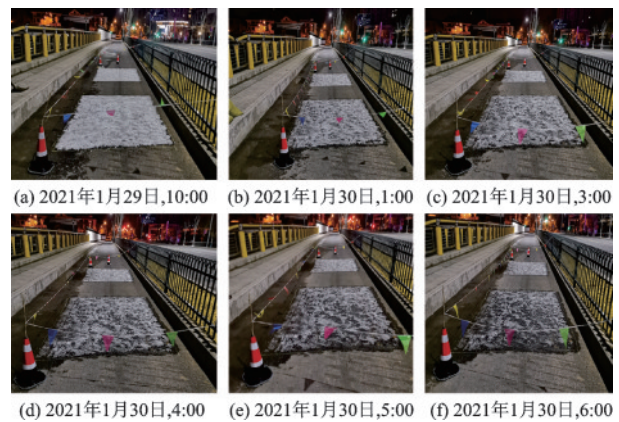


图7 桥面板底部埋管形式下桥面融冰过程照片

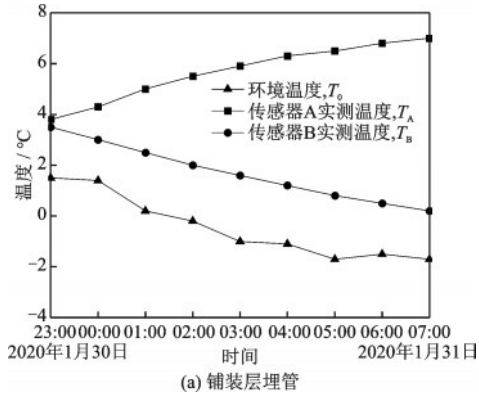
Fig. 7 Photographs of ice melting process of the hydraulic bridge deck with heat exchange pipes buried at the bottom

试验结果表明,底部换热管8小时除冰量约为铺装层换热管的50%。但是,铺装层换热管与表面距离小,换热管顶部的桥面温度高,融冰速度快,桥面除冰存在较大的不均匀性;底部换热管与表面距离大,引起桥面温度的不均匀性较小,桥面除冰效果均匀。相关学者利用有限元模拟分析得到桥面热流密度分布不均匀性随着埋管深度增加而减小<sup>[12]</sup>,与本文试验结果一致。

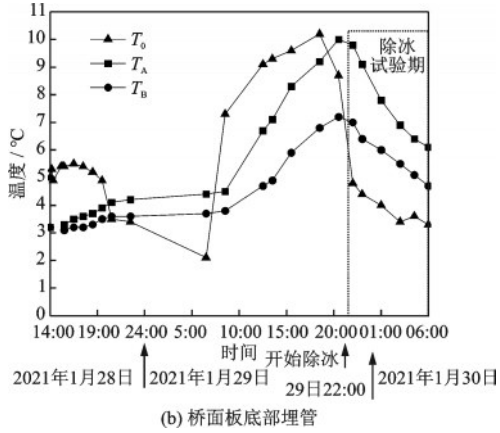
### 3.3 桥面板温度

铺装层换热管除冰试验过程中面板的温度随时间的变化如图8(a)所示。试验开始时,传感器A、B测得面板铺装埋管层的初始温度均为3.8℃;试验期间环境温度持续下降,桥面板不断向周围环境散热;B点温度在试验期间持续下降,在试验结束时,温度降至1.0℃;由于循环系统的作用,A点的温度持续上升,在试验结束时升至7.8℃。

底部换热管除冰试验提前32小时对面板进行了



(a) 铺装层埋管



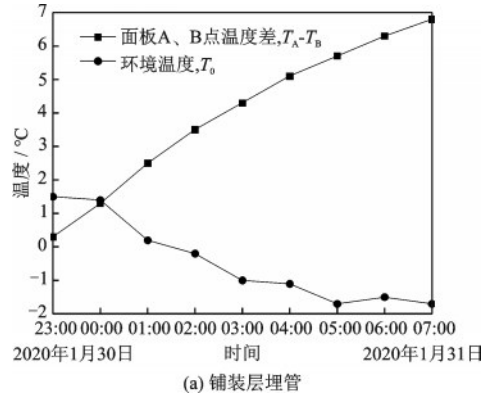
(b) 桥面板底部埋管

图8 试验期间桥面板的温度随时间的变化曲线

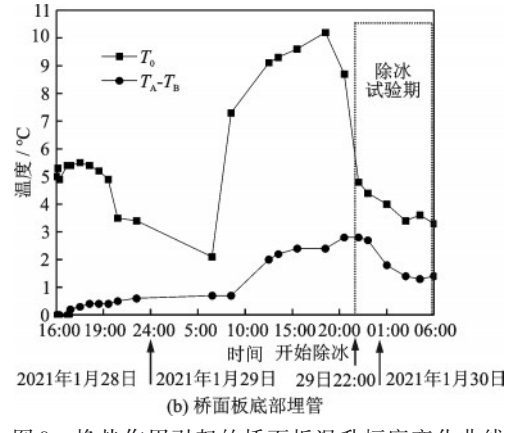
Fig. 8 Temperature curves of the bridge deck with time during the tests

预热,试验过程中面板的温度如图8(b)所示。除冰试验开始时,传感器A测得的温度为 $9.8^{\circ}\text{C}$ ,传感器B测得的温度为 $7.0^{\circ}\text{C}$ ;试验过程中环境温度不断下降,加之融冰吸热,面板A、B两点的温度都持续下降;试验结束时,A点温度降至 $6.1^{\circ}\text{C}$ ,B点温度降至 $4.7^{\circ}\text{C}$ 。

A、B两点的温度差可认为是循环换热系统作用于面板的结果,铺装层换热管除冰试验过程中A、B两点的温差随时间的变化曲线如图9(a)所示。试验开始时,两点温度相等;试验过程中两点的温差持续升高,试验结束时升至 $6.8^{\circ}\text{C}$ 。底部换热管除冰试验过程中A、B两点的温差如图9(b)所示。由于提前32小时预热作用,除冰试验开始时,A、B两点已经有 $2.8^{\circ}\text{C}$ 的温度差;除冰试验过程中,A、B两点的温差持续下降;试验结束时,两点的温度差值降至 $1.4^{\circ}\text{C}$ ,试验期间平均温差约 $1.9^{\circ}\text{C}$ 。底部换热管除冰试验中面板A、B两点温差没有像铺装层换热管除冰试验那样持续升高,而是持续降低;这说明除冰过程中,换热管的热循环作用对面板表面的除冰影响较小,而提前32小时预热储存于混凝土中的热量是用于除冰的主要热源。



(a) 铺装层埋管



(b) 桥面板底部埋管

图9 换热作用引起的桥面板升温幅度变化曲线

Fig. 9 Curve of temperature rise amplitude of the bridge deck caused by heat exchange

### 3.4 平均热效率的计算

有效热功率为用于除冰的热功率,可通过除冰量或基于桥面板温度通过一维傅立叶热传导定律估算。有效热功率与总热功率的比值定义为热效率 $\theta$ ,表示如下:

$$\theta = q'/q \times 100(\%) \quad (4)$$

(1) 根据除冰量计算

融雪所需热量根据式(5)计算<sup>[21]</sup>:

$$q_0 = q_s + q_m + A_r(q_h + q_e) \quad (5)$$

$$q_s = \rho_{\text{water}} s (c_{p,\text{ice}}(T_{\text{is}} - T_0) + c_{p,\text{water}}(T_l - T_{\text{is}})) / c_1 \quad (6)$$

$$q_m = \rho_{\text{water}} s h_{\text{if}} / c_1 \quad (7)$$

式中, $q_0$ 为融雪面所需的热功率; $q_s$ 为显热功率; $q_m$ 为潜热功率; $A_r$ 为无积雪面积比; $q_h$ 为表面对流和辐射热功率; $q_e$ 为水蒸发所需的热量; $\rho_{\text{water}}$ 为水的密度; $s$ 为降雪量水当量; $c_{p,\text{ice}}$ 为冰的比热容; $T_{\text{is}}$ 为冰的融化温度; $T_0$ 为环境温度; $T_l$ 为液膜温度,通常取 $0.56^{\circ}\text{C}$ ; $c_{p,\text{water}}$ 为水的比热容; $c_1$ 为常数,等于 $3.6 \times 10^6$ ; $h_{\text{if}}$ 为冰的熔化热。

将循环换热系统8小时融冰量转化为8小时的降

雪计算平均有效热功率;试验中,冰层阻碍了表面的对流辐射和水分蒸发,故 $A_r$ 可考虑为零。铺装层换热管除冰系统8小时融冰量为24.15 kg,转化为8小时降雪量为0.48 mm/h。根据式(5)计算出系统8小时内融冰的平均有效热功率为45.4 W/m<sup>2</sup>,通过式(4)计算平均热效率为24.7%。底部换热管8小时融冰量为12.0 kg,转化为8小时平均降雪率为0.24 mm/h;根据公式计算得到系统在8小时内融冰的平均有效热功率为22.9 W/m<sup>2</sup>,平均热效率为12.5%。

### (2) 根据导热计算

有效热功率可以通过一维傅立叶热传导定律,根据式(3)计算。铺装层换热管除冰试验8小时内A、B两点的平均温差约3.98℃;面板表面由于持续化冰,可认为是0℃;通过式(3)计算,平均有效热功率为45.5 W/m<sup>2</sup>,平均热效率为24.8%;试验结束时,A、B两点的温差为6.8℃,有效热功率为77.7 W/m<sup>2</sup>,对应热效率为42.4%。

通过融冰量计算平均热效率和基于面板温度的一维傅立叶热传导定律计算的热效率基本一致。试验结束时,面板的温度并没有达到稳定,由图8(a)可见,温度曲线仍呈上升趋势;说明铺装层换热管除冰的热效率可以升高到42.4%以上。埋管层以下混凝土中储存的热量不能用于除冰;随着面板温度的升高,埋管层以下混凝土吸收的热量将逐渐减少,更多的热量传向表面用于除冰,所以热效率会逐渐升高。因此,对桥面板提前预热有利于提高桥面板的热效率和融冰效果。

底部换热管除冰试验中 $T_A-T_B$ 的平均值为1.9℃,计算得到有效热功率为21.7 W/m<sup>2</sup>,热效率为11.9%,与通过融冰量计算的热效率基本一致。在提前32小时预热的条件下、在相同的换热功率下,底部换热除冰系统的热效率约为铺装层换热除冰系统的50%。

### 3.5 桥面板结构响应与温度应力

换热系统的运行使桥面板温度升高,产生膨胀。但在不均匀温升和约束条件下,桥面板不能自由变形,产生附加的温度应力,可能导致混凝土开裂,影响桥梁的使用寿命。铺装层换热管热响应试验已经得到换热引起的温度应力小于混凝土抗压强度的5%<sup>[22]</sup>,本文重点分析底部换热管除冰引起的桥面板温度应力。应变可以通过贴在混凝土底部的应变计得到,温度应力可以通过式(8)计算<sup>[23]</sup>:

$$\sigma_{\text{thermal}} = E \cdot (\beta \Delta T - \epsilon_{\text{obs}}) \quad (8)$$

式中, $\sigma_{\text{thermal}}$ 为桥面板的附加温度应力; $\epsilon_{\text{obs}}$ 为试验过程中测得的桥面板的应变; $\Delta T$ 为试验过程中桥面板的温度变化; $E$ 为桥面板混凝土的杨氏模量,这里取 $2.5 \times 10^4$  MPa; $\beta$ 为桥面板混凝土的热膨胀系数(取 $10^{-5}/^\circ\text{C}$ )。

图10显示了桥面板底部应变、应力与温度的关系。实测应变随着温度的升高而线性增大,膨胀系数为 $0.61 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。实测应变为自由膨胀应变的61%,说明混凝土面板中存在额外的温度应力。底部换热管除冰试验过程中,桥面板底部混凝土最高温升为31℃,对应最大温度应力为2.78 MPa,为混凝土强度(19.1 MPa)的14.5%。换热引起的温度应力不会引起混凝土破坏,但是应用中需注意控制水温不宜过高。

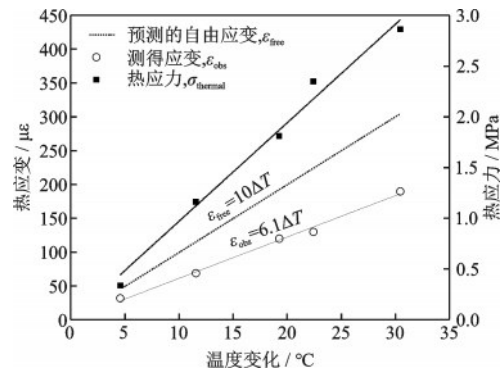


图10 桥面板底部埋管形式下桥面板温度应变与温升关系曲线

Fig. 10 Relation curves between thermal induced strain and temperature rise of the bridge deck with heat exchange pipes buried at the bottom

## 4 结论

面向新建桥梁和既有桥梁安装需求,对桥面板展开了铺装层换热管(距表面14 cm)和桥面板底部换热管的桥面除冰现场试验。在现场试验条件下,可以得到以下结论:

(1) 铺装层换热管除冰试验,系统热效率随着循环时间而增大。热循环8小时后,系统热效率约42%;8小时平均热有效率约25%。

(2) 在相同的热交换功率下,底部换热管除冰系统提前32小时开启,热效率约为铺装层换热管除冰系统的50%。

(3) 换热功率为183.3 W/m<sup>2</sup>条件下,底部换热

管除冰试验引起的混凝土最大温升为 31℃,相应温度应力为混凝土强度的 14.5%,远大于铺装层换热管除冰引起的热应力。底部换热管除冰系统中需控制液体温度不宜过高。

## 参考文献:

- [1] Zhao H M, Wu Z M. Concrete pavement deicing with carbon fiber heating wires[J]. Cold Regions Science & Technology, 2011, 65(3): 413-420.
- [2] 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 Z Z, Zhang Y W, Ji P Y, 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. (in Chinese)
- [3] Liu K, Fu C L, Xie H Z. Design of electric heat pipe embedding schemes for snow-melting pavement based on mechanical properties in cold regions[J]. Cold Regions Science & Technology, 2019, 165:102806.
- [4] 熊泽琛, 王天麟, 郭红仙, 等. 基于浅层地热能的寒区隧道排水沟保温防冻可行性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(4):556-563.  
Xiong Z C, Wang T L, Guo H X, et al. Feasibility study on insulation and antifreeze of drainage ditch in cold area tunnel based on shallow geothermal energy [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(4):556-563. (in Chinese)
- [5] Xu H, Wang D, Tan Y, et al. Investigation of design alternatives for hydronic snow melting pavement systems in china[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 170: 1413-1422.
- [6] 郭红仙, 孟嘉伟, 朱振南. 能源隧道热响应试验数值分析与适用性评价[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(4):572-578.  
Guo H X, Meng J W, Zhu Z N. Numerical analysis and applicability evaluation of thermal response test in energy tunnels[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(4):572-578. (in Chinese)
- [7] Koenig G, Ryerson C. An investigation of infrared deicing through experimentation[J]. Cold Regions Science & Technology, 2011, 65(1): 79-87.
- [8] 焦生杰, 唐相伟, 高子渝, 等. 微波除冰效率关键技术研究[J]. 中国公路学报, 2008, 21(6): 121-126.  
Jiao S J, Tang X W, Gao Z Y, et al. Study of key technology on microwave deicing efficiency[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(6): 121-126. (in Chinese)
- [9] 陈鑫, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 桥面融雪除冰能量桩热泵系统换热效率现场试验[J]. 中国公路学报, 2021, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20211012.1857.002.html>.
- [10] Mirzanimadi R, Hagentoft C E, Johansson P, et al. Anti-icing of road surfaces using hydronic heating pavement with low temperature [J]. Cold Regions Science & 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 Q Y, Li W Z. Research on snow-melting mechanism in solar-heat storage in soil snow melting systems [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2008, 29(11): 1385-1389. (in Chinese)
- [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 W J, Jiang Y Q, Yao Y, 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. (in Chinese)
- [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] Ho I H, Li S, Abudureyimu S. Alternative hydronic pavement heating system using deep direct use of geothermal hot water[J]. Cold Regions Science & Technology, 2019, 160(4): 194 - 208.
- [16] 张登春, 章照宏, 袁江雅, 等. 热力管加热桥面抗冰融冰试验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(12): 179-185.  
Zhang D C, Zhang Z H, Yuan J Y, et al. Experimental research on anti icing and ice melting of bridge deck by heat pipe heating [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(12): 179-185. (in Chinese)
- [17] Yu X B, Hurley M T, Li T. Experimental feasibility study of a new attached hydronic loop design for geothermal heating of bridge decks [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 164: 114507.

(本文责编:赵霞)

(下转第 912 页)