

# 碳纤维发热桥面热量耗散分析

卜胤<sup>1</sup>, 周昌<sup>1</sup>, 王斯倩<sup>1</sup>, 朱俊<sup>2</sup>

(1. 江西省高速公路养护工程技术研究中心, 江西 南昌 330133; 2. 江西省交通科学研究院)

**摘要:**利用碳纤维发热线加热融化桥面冰雪对保障车辆安全通行具有重要的意义。为了解决桥梁内置碳纤维发热线设计理论不足的问题, 该文分析了桥面热能交换过程, 提出采用综合换热系数表征潜热通量与对流换热量, 成型 C50 水泥混凝土 + AC-20 沥青混凝土 + SMA-13 沥青混凝土大板试件进行室内温升试验模拟碳纤维发热桥面的加热过程, 基于能量守恒定律研究了碳纤维发热桥面的热量耗散机理。研究结果表明: 对流换热和潜热是影响碳纤维发热桥面热量耗散的主要方式; 温度对碳纤维发热桥面融雪化冰影响作用最大, 风速次之, 冰层厚度影响作用最小。根据桥面综合换热系数, 同时考虑不同地区桥梁所处的气候环境和应急通行需求, 可以经济合理地设计出桥面内置碳纤维发热线的布设方案。

**关键词:**碳纤维发热桥面; 热量耗散; 融雪化冰; 综合换热系数

## 1 引言

在冬季, 冰雪天气常导致高速公路产生湿滑路况, 使高速行驶的车辆制动距离比正常条件下远, 行驶平稳性也大幅度降低, 容易发生车辆追尾、倾翻等重大交通事故, 给国家造成不可估量的经济损失。为了降低事故率, 交通主管部门经常采取封道措施限制车辆通行, 这样给人们的出行带来极大的不便。

桥梁作为高速公路的咽喉, 保障桥梁安全顺畅通行对维持公路正常运营起到非常重要的作用。由于桥梁下部处于悬空状态, 与空气的接触面多于路面, 因此桥梁与外界会产生更多的热交换。根据吕晶晶等研究发现, 寒冷季节桥面温度比路面温度低 2℃, 桥面 0℃ 以下的低温维持时间为路面维持时间的 2 倍左右; 陈仕周等通过对多个不同地区雪天路况的调研, 发现桥面结冰速度比路面结冰速度快 2 倍左右, 路面融冰速度比桥面融冰速度快 3 倍左右。在低温、雨雪天, 桥梁比公路更容易发生积雪结冰, 且冰雪覆盖时间更长。因此, 解决桥面积雪结冰问题具有重要的意义。

近年来, 道路工作者们热衷于研究采用在桥面混凝土结构层中内置电加热系统方式进行融雪化冰。这项技术在中国寒冷地区的桥梁、隧道和收费站出入口等工程中也得到了广泛应用。相比于机械除雪和融雪剂除雪等方法, 利用电加热系统除冰雪具有无污染、控

制方便、热稳定性好等优点。碳纤维发热线是电加热方法中的一种, 具有施工方便、使用寿命长、电热转换效率高等优点。然而, 通过碳纤维加热方式进行融雪化冰有时效果不太理想, 特别是在 -10℃ 以下低温大风环境中, 将桥面冰雪融化往往需要几十个小时。为了缩短融冰时长, 赵四龙等采用反热毯作为隔热层铺设在混凝土中, 减少热能向下传导以提高热能利用率; 陈绍辉等将发热线布设于沥青混凝土上中面层之间以提高发热效率, 均取得了较好的效果。然而, 反热毯和沥青混凝土中的发热线均会成为桥面结构中的薄弱层, 容易造成桥面裂缝。此外, 大部分研究仅是凭经验给出发热线的铺装功率, 不能针对各种不同环境和使用期望要求得出理论铺装功率。因此, 该文通过对碳纤维发热桥面热量耗散进行分析, 研究碳纤维发热线所产生热量的利用与损失机理, 期望为碳纤维发热桥面布设方案的设计和桥面融雪化冰效果的改善提供参考。

## 2 桥面热能交换

发生在桥梁表面的热能交换形式主要包括: 热传导、热对流和热辐射, 热传导是桥梁结构内部的热量传递过程, 对整个桥梁系统不产生能量耗散。然而, 热对流和热辐射属于桥面与外界环境发生的热能交换过程, 是桥面能量耗散的主要方式。桥面热能交换过程

如图 1 所示。

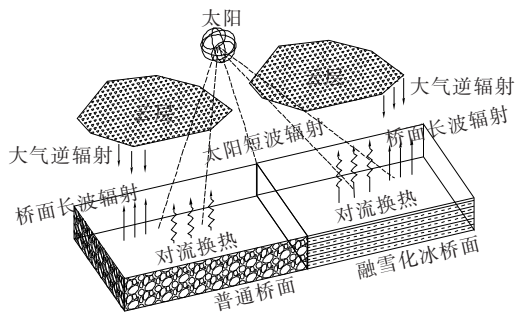


图 1 桥面热能交换

## 2.1 辐射热交换

桥面与外界的热辐射交换包括自身向外发出的辐射能和从外界吸收的辐射能,其中桥面发出的辐射能为长波辐射,吸收的辐射能主要是太阳发射的短波辐射和大气逆辐射。因为沥青混凝土的辐射常数为 3.46,所以可近似地将沥青混凝土桥面看作为灰体,根据斯特藩—玻尔兹曼定律,沥青混凝土桥面与大气之间的辐射热交换系数  $\alpha_s$  为:

$$\alpha_s = \epsilon \times \sigma \times K \quad (1)$$

式中:  $\epsilon$  为辐射率系数,沥青混凝土取 0.98;  $\sigma$  为斯特藩—玻尔兹曼常数,其值为  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $K$  为温度系数,与辐射介质表面温度有关,在冬季常取  $0.8 \times 10^8 \text{ K}^3$ 。

桥面与外界产生的辐射热交换量  $Q_s$  为:

$$Q_s = \alpha_s \times (T_s - T_a) \quad (2)$$

式中:  $T_s$  为桥面表面温度;  $T_a$  为大气温度。

## 2.2 对流换热

桥面结构内的能量大部分是通过与表面空气的对流换热散失的,风速和桥面温度与周围空气温度之差是影响对流换热系数的主要因素。根据文献[12]当风速  $v \leq 5.0 \text{ m/s}$  时,可采用 Jürges—Nusselt 公式计算对流换热系数:

$$\alpha_k = 2.6 \times (\Delta T^{1/4} + 1.54v) \quad (3)$$

桥面与外界产生的对流换热热量  $Q_k$  为:

$$Q_k = \alpha_k \times (T_s - T_a) \quad (4)$$

## 2.3 蒸发换热

在冬季特殊气候条件下,桥面经常因为下雨、下雪和降霜天气成为湿表面,水分蒸发时会从桥梁结构中带走一部分热量,这部分热量称为潜热通量。潜热通量对桥面温度会产生重要的并且直接性影响,因此,在碳纤维发热桥面融雪化冰过程中能量的损失需要考虑潜热通量,其可以通过下式进行计算:

$$Q_c = A_c \times \rho \times C_E \times v \times (q_a - q_s) \times (T_s - T_a) = \alpha_c \times$$

$$(T_s - T_a) \quad (5)$$

式中:  $A_c$  为凝结潜热,其值为  $2.5 \times 10^6 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\alpha_c$  为潜热通量系数;  $\rho$  为近桥面空气密度;  $C_E$  为水气输送系数,其值为  $0.15 \times 10^{-4}$ ;  $v$  为近桥面风速;  $q_a$  为近桥面空气比湿;  $q_s$  为桥面湿度,由桥面湿度参数  $W_s/W_c$  决定,  $W_s$  和  $W_c$  为桥面单位体积混凝土湿重和干重。

## 2.4 热能交换总量

桥面与外界产生的热能交换总量  $Q$  为:

$$Q = Q_s + Q_k + Q_c = (\alpha_s + \alpha_k + \alpha_c) \times \Delta T \quad (6)$$

由式(1)~(6)可知,在相同的气候条件下,碳纤维发热桥面与普通无发热桥面的辐射热交换系数、对流换热系数和潜热通量系数均相同,而碳纤维发热桥面所产生的热量一部分通过热传导的方式使桥梁结构本身温度上升,提高了碳纤维发热桥面与近桥面空气的温度差,从而使得桥面与外界产生的热能交换总量增加。辐射热交换系数、对流换热系数和潜热通量系数及发热桥面与近桥面空气的温度差是影响桥面能量耗散的决定因素,其中发热桥面与近桥面空气的温度差通过温度传感器能够直接测得,辐射热交换系数可以采用式(1)计算得到。然而,确定潜热通量参数比较困难,难以准确计算,因此可以将潜热通量与对流换热量作为整体考虑,确定它们的综合换热系数,分析碳纤维发热桥面通过潜热和对流换热所损失的热量。

该文通过封闭冷库内碳纤维发热混凝土试件的温升试验,根据能量守恒定律反算综合换热系数,为了排除辐射换热的影响,封闭冷库由反射率高的铝合板制成以隔绝外界辐射,并且自身产生的辐射会通过铝合板反射的方式接收,从而能量不会通过辐射的方式损失。由于潜热通量系数和对流换热系数的共同点是均与近桥面风速有关,因此要在不同风速等级条件下进行温升试验以确定相对应的综合换热系数。

## 3 室内试验研究

### 3.1 试验材料及设备

试验采用 PAN 基碳纤维制成的 24K 硅胶外皮碳纤维发热线,它能够满足桥面结构特殊环境对内置材料特性的基本要求,采用高精度、高稳定性的 JMT-36C 型电阻式温度传感器监测试件内部温度,其电阻值会随着温度变化而呈现有规律的变化,通过万用表测量其电阻值,进而可以转换为与其相对应的温度值。将试件放置于智能控温的封闭冷库中进行温升试验,同时采用风扇鼓风方法模拟桥面结构所处的有风环

境,并利用风速仪进行风速等级的调控。碳纤维发热线的性能如表 1 所示。

表 1 24K 碳纤维发热线的性能

发热线直 径/mm	热效率/ %	线功率/ (W·m <sup>-1</sup> )	耐热温 度/℃	电阻值/ (Ω·m <sup>-1</sup> )	抗拉强 度/GPa	抗拉模 量/GPa
6	>98	18	150	17~20	>3.5	>230

3.2 试件成型

碳纤维发热混凝土试件的结构形式为:10 cm C50 水泥混凝土+6 cm AC-20 沥青混凝土下面层+4 cm SMA-13 沥青混凝土上面层,试件尺寸为 50 cm×50 cm×20 cm,整个成型过程在特制的标准模具中完成。在成型试件时,将预先按 U 形方式绑缚碳纤维发热线的钢筋网固定在水泥混凝土中,碳纤维发热线布设间距为 5 cm,布设在距离水泥混凝土底面 7 cm 高度处,铺装功率为 360 W/m<sup>2</sup>。将用于监测试件内部温度的电阻式温度传感器分别安装在水泥混凝土层中间、沥青混凝土下面层中间和沥青混凝土上面层中间。在浇筑水泥混凝土板时,在其中心位置附设电阻式温度传感器,用于监测试件水泥混凝土内部温度。标准养生 7 d 后在水泥混凝土板上洒布黏层油,然后用平板夯成型 AC-20 沥青混凝土下面层,洒布适量黏层油并布设上面层温度传感器,用于监测试件中面层内部温度。最后成型 SMA-13 沥青混凝土上面层。为了保证只有试件上表面与外界进行热能交换,试件侧面与底面均包有聚苯乙烯泡沫塑料板。

3.3 试验方法

在加热之前,将试件放入冷库中冷冻 10 h 以上,使试件温度降至设定的环境温度并恒温 2 h。然后,在试件表面将碎冰压密固结成一定厚度的冰层来模拟桥面结冰状态。通过风速测试仪调试风扇的档位和距离,以控制试件表面的风速。为了确定温度、风速和冰层厚度 3 种环境因素对碳纤维发热桥面混凝土融雪化冰的影响与作用,采用正交试验设计方法,安排三因素(温度、风速和冰层厚度)三水平(-2、-6、-10℃;1 级风、2 级风、3 级风;5、10、15 mm)的正交表,进行碳纤维发热混凝土试件温升正交试验,在正交试验结果的直观分析中,对试验数据的分析采用极差法,即通过各因素列的极差大小来表示各个因素对评价指标影响的主次顺序,采用多因素方差分析法确定各个因素的显著性水平。为了计算不同风速等级相对应的综合换热系数,试验拟设定环境温度为-2℃,冰层厚度为 5 mm,取对应等级风速范围的中值,分别在无风(0.1

m/s)、1 级(0.9 m/s)、2 级(2.5 m/s)和 3 级(4.4 m/s)风速等级下进行碳纤维发热混凝土试件温升试验。在温升试验过程中,每隔 30 min 采用万用表测量试件内部电阻式温度传感器的电阻值,根据 2K 热敏电阻阻值-温度对照表换算成对应的温度。当试件表面冰层完全融化时,停止加热并结束温升测量。

3.4 试验结果与分析

考虑不同环境条件影响下的碳纤维发热混凝土试件融雪化冰正交试验结果如表 2 所示。

表 2 碳纤维发热混凝土试件温升正交试验结果

试验 编号	环境条件			融化时 间/h
	温度	风速	冰厚	
1	1(-2℃)	3(3级)	3(15 mm)	21.4
2	3(-10℃)	2(2级)	3(15 mm)	38.2
3	1(-2℃)	1(1级)	1(5 mm)	6.4
4	2(-6℃)	1(1级)	3(15 mm)	14.9
5	2(-6℃)	2(2级)	1(5 mm)	20.0
6	1(-2℃)	2(2级)	2(10 mm)	9.8
7	2(-6℃)	3(3级)	2(10 mm)	35.2
8	3(-10℃)	3(3级)	1(5 mm)	57.1
9	3(-10℃)	1(1级)	2(10 mm)	26.2
K <sub>1</sub>	37.6	47.5	83.5	
K <sub>2</sub>	70.1	68.0	71.2	
K <sub>3</sub>	121.5	113.7	74.5	
$\overline{K_1}$	12.5	15.8	27.8	
$\overline{K_2}$	23.4	22.7	23.7	
$\overline{K_3}$	40.5	37.9	24.8	
P 值	0.032	0.049	0.593	
极差	28.0	22.1	4.1	

由表 2 可知:在不同温度和风速影响作用下,P 值均小于 0.05,表明风速和温度对碳纤维发热混凝土试件融雪化冰具有显著的影响;在不同冰层厚度影响作用下,P 值大于 0.05,表明冰层厚度对碳纤维发热混凝土试件融雪化冰影响较小。此外,通过极差比较可得,温度(28.0)>风速(22.1)>冰层厚度(4.1),表明

温度对碳纤维发热混凝土试件融雪化冰影响作用最大,风速次之,冰层厚度影响作用最小。

不同风速等级下碳纤维发热混凝土温升试验结果如图 2 所示。

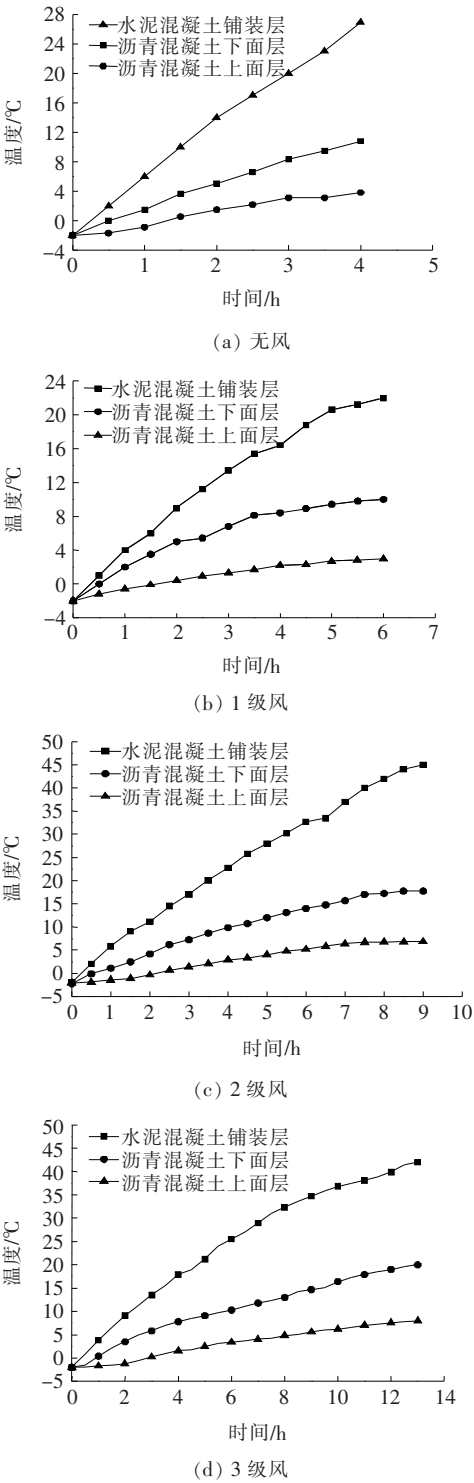


图 2 温升试验结果

从图 2 可以看出:随着加热时间增长,试件各结构层温度不断上升,其中水泥混凝土铺装层温度上升最

快,沥青混凝土上面层温度上升最慢。随着风速等级的增大,碳纤维发热混凝土试件融化表面冰层的时间增加,在无风条件下融化表面冰层需要 4 h,而在 3 级风速条件下融化表面冰层则需要 13 h,这表明风速是影响发热桥面热量散失的重要因素,决定着桥面的融雪化冰效率。

根据能量守恒定律,碳纤维发热线生成的热量应等于混凝土温度上升获得的比热容和试件表面潜热与对流换热散失的热量,即:

$$P \cdot t = V_1 \rho_1 c_1 \Delta T_1 + V_2 \rho_2 c_2 \Delta T_2 + V_3 \rho_3 c_3 \Delta T_3 + M \Delta T \cdot t \quad (7)$$

式中:  $P$  为碳纤维发热线铺装功率( $\text{W}/\text{m}^2$ );  $t$  为发热时间( $\text{s}$ );  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  分别为各结构层混凝土的体积( $\text{m}^3$ );  $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 、 $\rho_3$  分别为各结构层混凝土的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  分别为各结构层混凝土的比热容 [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ];  $\Delta T_1$ 、 $\Delta T_2$ 、 $\Delta T_3$  分别为各结构层混凝土上升的温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $M$  为综合换热系数 [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ];  $\Delta T$  为试件换热表面与近表面空气的温度差( $^{\circ}\text{C}$ )。

通过绝热温升试验测量得到混凝土的比热容,试验各材料热物性参数如表 3 所示。

表 3 各材料热物性参数

材料	密度 $\rho/$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	比热容 $c/$ [ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ]
水泥混凝土	2 500	846
AC-20C	2 428	947
SMA-13	2 420	950

将试件的热物性参数和不同风速等级下的温升试验结果代入式(7)进行计算,得到与风速相对应的综合换热系数  $M$ ,如表 4 所示。

表 4 综合换热系数  $M$

风速	综合换热系数 $M/[\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}]$
无风	45
1 级风	68
2 级风	105
3 级风	165

从表 4 可以看出:风速越大,桥面综合换热系数越大,在桥面温度高于外界环境温度时,桥梁热量损失越大。此外,随着碳纤维发热桥面与近桥面空气的温差增大,桥梁热量散失也成倍数递增。因此,桥梁在经过一段时间加热后,随着加热时间延长,桥面温度上升



变慢。

由上可得:根据不同地区桥梁所处的气候环境,以及交通管理部门的应急通行需求,同时结合考虑使用经济性来设计碳纤维发热线的铺装功率,达到了经济、快速融化桥面冰雪的目的。以该文所研究的桥梁—结构为例,以碳纤维发热量与桥面达到融雪化冰条件时的综合换热量相等为原理,仅根据冬季气候环境推荐合理的桥梁内置碳纤维发热线铺装功率,计算见式(8),结果如表5所示。

$$P=M\cdot\Delta T$$

(8)

表5 推荐设计铺装功率				
气温/ ℃	不同风速的铺装功率/(W·m <sup>-2</sup> )			
	无风	1级风	2级风	3级风
—1	45	68	105	165
—2	90	136	210	330
—3	135	204	315	495
—4	180	272	420	660
—5	225	340	525	825
—10	450	680	1 050	1 650

4 结论

桥面与外界环境进行热量交换主要是通过辐射换热形式和对流换热形式,当桥面湿度大于空气湿度时,桥梁损失的热量中还包括一部分潜热通量。由于辐射换热受温度的影响较小,因此,相比于普通无发热桥面,碳纤维发热桥面主要通过对流换热和潜热的方式产生热量耗散。该文通过室内温升试验模拟碳纤维发热桥面的加热过程,根据能量守恒定律分析碳纤维发热桥面的热量耗散机理,得到以下主要结论:

(1) 辐射热交换系数、对流换热系数和潜热通量系数及发热桥面与近桥面空气的温度差决定桥面热量耗散的大小。

(2) 碳纤维发热线生成的热量一部分通过热传导使混凝土获得比热容,温度上升,另一部分则通过混凝土

土表面潜热与对流换热散失。

(3) 温度对碳纤维发热混凝土试件融雪化冰影响作用最大,风速次之,冰层厚度影响作用最小。

(4) 风速越大,综合换热系数越大,桥面热量散失速度越快。风速是影响发热桥面热量散失的关键气候因素,决定着桥面的融雪化冰效率。

(5) 根据该文得到的桥面综合换热系数,同时结合不同地区桥梁所处的气候环境,以及交通管理部门的应急通行需求,可以经济合理地设计出桥面内置碳纤维发热线的布设方案。

参考文献:

[1] 吕晶晶,牛生杰,周悦,等.冬季高速公路路桥温度变化规律及能量平衡分析[J].大气科学学报,2013(5).

[2] 陈仕周,倪小军.桥面铺装与路面温度差异研究[J].中国公路学报,2005(2).

[3] 谭红霞,涂莉,李建男.智能控温防冻桥面的构思和设计[J].吉首大学学报(自然科学版),2012(2).

[4] 李新贺,朱启洋,朱岩.碳纤维发热线在桥面融冰化雪中的应用[J].华东公路,2016(5).

[5] 彭余华,鲍梦捷,陈绍辉.内置碳纤维发热线融冰技术的现状与发展[J].筑路机械与施工机械化,2016(2).

[6] 赵宏明,吴智敏,车广杰.碳纤维发热线布置于路面融雪化冰间距研究[J].混凝土,2010(3).

[7] 张倩雯,赵艳华,吴智敏.混凝土路面碳纤维发热线融雪化冰研究[J].公路交通科技,2015(2).

[8] 赵四龙,原鹏博,王少松,等.高寒地区隧道路面发热电缆融雪化冰试验研究[J].公路交通科技(应用技术版),2015(3).

[9] 陈绍辉,彭余华,鲍梦捷.内置碳纤维发热线的融冰桥面设计与施工[J].筑路机械与施工机械化,2016(2).

[10] 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(12).

[11] 汪海年,傅香如,侯忠杰,马磊.路面材料辐射换热试验方法[J].中外公路,2009(2).

[12] 重庆大学工程热物理研究所.钢箱梁桥沥青路面温度场数学模拟研究报告[R],2001.

[13] Rayer P J. The Meteorological Office Forecast Road Surface Temperature Model[J]. Meteor Mag,1987,116:180—191.