

沥青混凝土预埋碳纤维绳发热升温试验

袁玉卿^{1,2}, 张永健³, 蔚旭灿⁴

(1. 河南大学 土木建筑学院, 河南 开封 475004; 2. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450002;
3. 湖南省高速公路管理局, 湖南 长沙 410001; 4. 中国人民解放军 92305 部队, 山东 胶州 266300)

摘要:为了研究预埋碳纤维绳(碳绳)发热对沥青混凝土表面温度变化的影响规律,进行了不同长度碳绳单元的发热升温试验,绘制了升温及降温曲线,拟合得到温度变化与时间的数学关系式,进行了功率及用电量分析。研究表明:随着时间的延长,试件表面温度有持续上升趋势,与环境温度相比,2.5 m 长碳绳发热单元 15 min 升高了 4 ℃;3.5 m、4.5 m、5.5 m 长碳绳发热单元 30 min 分别升高了 3.5 ℃、3.2 ℃、1.3 ℃;单元发热功率分别为 498 W/m²、292 W/m²、186 W/m²、119 W/m²、89 W/m²;断电后试块表面降温过程非常缓慢,温度变化与通电时间有良好的数学相关性;碳绳发热性能良好,沥青混凝土中埋设碳绳能起到较好的发热升温效果。依据降雪带的分布,推荐了发热单元的选择方案及设计方法。

关键词:道路工程;沥青混凝土;融雪化冰;电发热;碳纤维绳

中图分类号:U416.2 **文献标志码:**A

Experiments on heating and warming of carbon fibers ropes embedded in asphalt concrete

YUAN Yu-qing^{1,2}, ZHANG Yong-jian³, YU Xu-can⁴

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China; 2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, Henan, China; 3. Hunan Bureau of Expressway Administration, Changsha 410001, Hunan, China; 4. 92305 Troops, The Chinese People's Liberation Army, Jiaozhou 266300, Shandong, China)

Abstract: To study the laws of carbon fiber rope (carbon rope) embedded in the asphalt concrete influencing on its surface temperature, this paper conducted the heating and warming experiments of different length carbon rope units. Meanwhile, the warming and cooling curves were drawn. Mathematical relationships between temperature and time were obtained through fitting. Moreover, the power and electricity consumption were analyzed. The results show that the surface temperatures of specimens are on the rise with the extension of time. Compared to the environment temperature, 2.5 m long carbon rope heating unit increases by 4 ℃ in 15 min. In 30 min, the heating units of 3.5 m, 4.5 m, 5.5 m long carbon ropes increase by 3.5 ℃, 3.2 ℃, and 1.3 ℃, respectively. The unit heating powers are 498 W/m², 292 W/m², 186 W/m², 119 W/m², and 89 W/m², severally. After the power supply is cut off, the surface cools very slowly. It has good mathematical correlation between temperature change and conduction time. In short, the carbon rope heating performance is favorable, which

can have better heat warming effects when it is embedded into the asphalt concrete. According to snowfall belt distribution, the selection scheme and design method of heating unit were recommended. 5 tabs, 8 figs, 14 refs.

Key words: road engineering; asphalt concrete; snow melting and deicing; electric heating; carbon fibers ropes

0 引言

沥青混凝土铺面积雪结冰给交通和行车安全造成严重威胁,常采用机械清扫或洒除冰盐等方式,以达到融雪除冰、交通畅通目的。但是机械清扫会破坏铺面的上层结构,而除冰盐由于含有氯离子等会腐蚀结构中的钢筋,这些措施都会造成路面、桥面、道面服务功能的降低及寿命衰减,而且对环境有持久性污染^[1-2]。为此,国内外专家积极探索新的融雪除冰方式,其中电发热为研究热点之一。

首先是自发热铺面材料的研究。唐祖全等研究了碳纤维水泥混凝土的导电及发热性能^[3];王虹等将石墨掺入沥青混凝土实现导电发热^[4];张永健等还加入碳纤维减小电阻^[5];马世宁等将电发热技术应用于机场道面融雪化冰^[6]。自发热材料铺面能起到较好的融雪化冰效果,但是电能消耗巨大、运营成本太高,不利于实际工程中大面积推广应用。

其次是发热电缆类研究。近年来,丹麦、挪威、美国等国家开展了发热电缆的应用研究。李炎锋等研究认为单位面积发热电缆铺装功率为 250~350 W 时,可以实现北京地区路面融雪化冰^[7];车广杰研究了碳纤维发热丝在混凝土中的铺设和应用^[8];陈龙等研究了碳纤维格栅电热路面及其融雪化冰性能^[9];赵宏明等用 Ansys 模拟了路面布置不同间距发热线的温度场分布^[10];李洪磊等以新疆且末机场为例,将自发热技术与传统方法进行综合评价^[11]。2007 年哈尔滨文昌高架桥从丹麦引进了电加热温控融雪技术,在上桥处匝道部分路面下铺设电热电缆线,起到了较好的融雪效果,但由于耗电量大而限制了使用。

综上所述,当前的电发热路面或电缆发热路面结构由于用电量较大而难以大面积应用。为此,本文研究采用市场上常见的碳绳,预埋进沥青混凝土结构中,通过优化发热单元碳绳长度,改变其电阻及发热功率,从而达到节能及融雪化冰之目的,最终实现冰雪天气道路的畅通。依据降雪带的分布,推荐发热单元选择方案,其研究成果将为铺面工程的融雪化冰提供理论依据和工程参考。

1 试验设计

1.1 发热原理

碳绳由碳纤维编绕而成,见图 1。碳绳具有强度高、质量轻、耐热性好、热膨胀系数小等特点,用于发热体和需要耐高温的细绳,具有良好的导电性能,一般用做导电电极等。

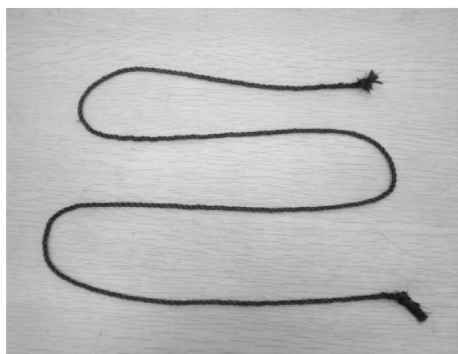


图 1 碳绳形态

Fig. 1 Shapes of carbon rope

在通电情况下,碳绳固有的电阻产生热量,热量将通过沥青混凝土传递,表面温度随之升高。尽管有大气流动或风的作用会带走一部分热量,但在持续通电发热的情况下,沥青混凝土表面会保持需要的温度。

1.2 试块制作

试块的制作采用沥青混合料搅拌锅、车辙板成型机,标准试块规格为 30 cm×30 cm×5 cm,分两次压实。首先在试模底部预洒一些沥青混合料,然后在底面向上 1.5~1.0 cm 处布设碳绳。为了真实模拟路用施工压实情况,试块均采用标准的轮碾成型法,碾压荷载为 10⁴ kg。

1.3 碳绳布设

设计、制作发热碳绳布设单元,简称发热单元。发热碳绳单元连续或间隔铺装,具体由试验确定。试验中碳绳在沥青混凝土试块中预埋在表面下 3.5~4.0 cm 处,碳绳间距约 4.5 cm,试块中埋入碳绳的净长度约为 2 m,见下页图 2。图 2 中带数字标号的点为温度检测点位,试验中其余长度的碳绳均做外接处理。为保证用电安全,采用 36 V 交流供电。

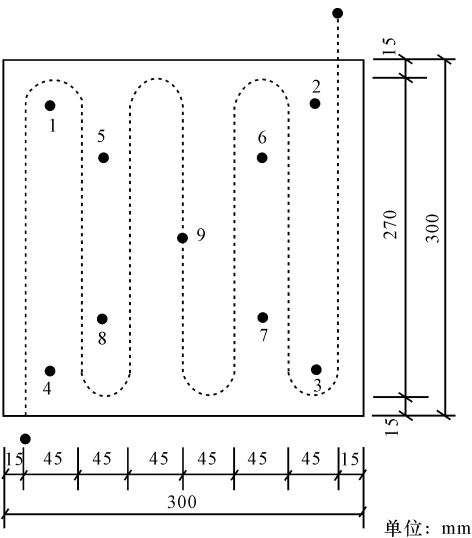


图 2 碳绳布设示意
Fig. 2 Layout of carbon rope

1.4 温度测量

试验中发现,导电材料表面各点的温度分布并不均匀,因此将表面进行网格划分,研究各代表点的温度上升情况,如图 3 所示。试验时每间隔 5 min 或 10 min 测试一次温度,每次测室内环境及碳绳温度各 3 个点分别求平均值,测试块表面 9 个点温度求平均值,连续测温 1 h。

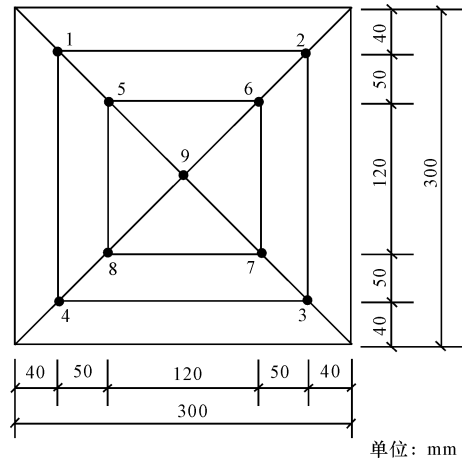


图 3 测点分布
Fig. 3 Distribution of measuring points

2 试验过程

按前面所述的试块制作方法,分别预埋 2.5、3.5、4.5、5.5、6.5 m 长碳绳单元,通电 1 h 研究其发热升温情况,测温间隔为 5 min,记录环境、试块及碳绳表面温度。由于 2.5 m 长碳绳单元发热升温过快过高,安全起见,只进行了 15 min 通电升温试验。通电结束后,连续检测 1 h,测温间隔为 5 min,记录

试块及碳绳表面温度。
2.1 通电升温试验
将 5 种不同长度碳绳的发热升温检测数据绘制在图 4 中,进行对比分析。

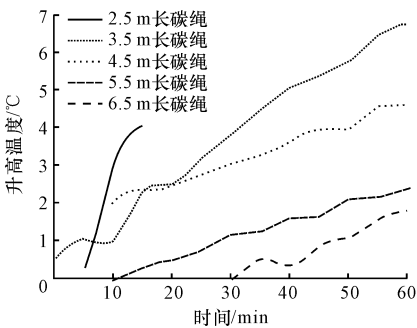


图 4 试块表面升高温度
Fig. 4 Elevated temperature of block surface

由图 4 可知,随着加电时间的增加,试块表面的温度均有所升高,碳绳越短的试块发热升温越快。2.5 m 长碳绳单元发热升温最快,15 min 时试块表面升高了 4℃。3.5 m 长碳绳单元发热升温也很快,30 min 时试块表面升高了 3.5℃。4.5、5.5 m 长碳绳单元 30 min 时试块表面温度升高了 3.2℃、1.3℃。说明长度 2.5~5.5 m 的碳绳单元发热升温效果显著。6.5 m 长碳绳单元 30 min 时试块表面温度与环境温度相差不大,说明其发热升温效果不佳。

将不同长度碳绳的发热升温数据进行整理,与试块表面温度差绘制在图 5 中,进行对比分析。

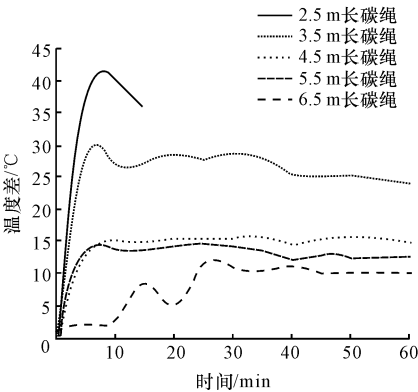


图 5 加电碳绳与试块表面温度差
Fig. 5 Temperature differences between powered carbon rope and block surface

由图 5 可知,经过一段时间,碳绳通电产生的热量传递到了试块表面,碳绳越短,试块内外的温差越大,试块表面得到的热量就越多,温度上升就越快。碳绳越长,试块表面的温度上升就越慢。加电 5 min

后,2.5 m 长碳绳与试块表面的温度差达到 36 ℃。10 min 后,碳绳与试块表面的温度差逐渐减小,最后基本稳定。对于 3.5 m、4.5 m 长碳绳,40 min 后温度差分别稳定在 25 ℃、15 ℃左右。碳绳越长,试块内外的温度差就越小。

2.2 断电降温试验

分别采用不同长度碳绳进行发热升温测量,达到 1 h 后断电,观测其温度下降过程,结果见图 6。

由图 6 可知,断电后,降温速度非常缓慢。2.5 m 长碳绳单元 30 min、60 min 时试块表面温度分别比环境高 5.7 ℃、2.8 ℃。3.5 m 长碳绳单元 30 min、60 min 时试块表面温度分别比环境高 5.0 ℃、2.7 ℃。4.5 m 长碳绳单元 30 min、60 min 时试块表面温度分别比环境高 3.2 ℃、2.6 ℃。对于 5.5 m 长碳绳,30 min、60 min 时分别比环境高 2 ℃、1.4 ℃。总之,随着时间的延长,试块表面温度逐渐降低,接近环境温度。

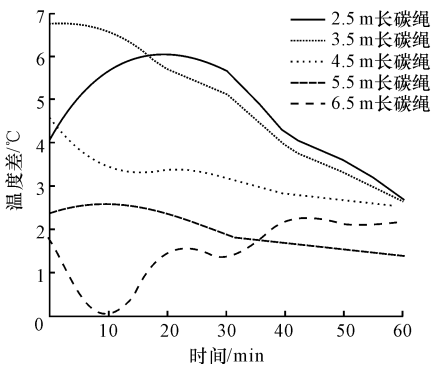


图 6 断电后试块表面与环境温度差
Fig. 6 Temperature differences between lost power block and surroundings

3 结果分析

3.1 发热效果

将图 4 的曲线进行数值拟合,求得试块表面升高温度与通电时间之间的关系式,见表 1。

表 1 试块表面升高温度与通电时间关系

Tab. 1 Relation between temperature rise of block surface and conduction time

碳绳长度/m	线性拟合	对数拟合	多项式拟合
2.5	$y_1=0.381\ 1x-1.363$ $R^2=0.945\ 2$	$y_1=3.514\ 9\ln(x)-5.308\ 2$ $R^2=0.992\ 6$	$y_1=-0.031\ 8x^2+1.016\ 7x-4.011\ 1$ $R^2=1$
3.5	$y_1=0.109x+0.456\ 5$ $R^2=0.990\ 7$		$y_1=-0.000\ 2x^2+0.123\ 1x+0.327$ $R^2=0.992$
4.5	$y_1=0.053\ 6x+1.452\ 1$ $R^2=0.990\ 1$	$y_1=1.509\ 9\ln(x)-1.8463$ $R^2=0.931\ 6$	$y_1=-1\times10^{-5}x^2+0.054\ 3x+1.442$ $R^2=0.990\ 1$
5.5	$y_1=0.048\ 7x-0.422\ 5$ $R^2=0.990\ 6$	$y_1=1.388\ 6\ln(x)-3.477\ 2$ $R^2=0.955\ 4$	$y_1=-0.000\ 2x^2+0.062\ 1x-0.609\ 9$ $R^2=0.993\ 6$
6.5	$y_1=0.060\ 2x-1.810\ 3$ $R^2=0.951\ 8$	$y_1=2.581\ 8\ln(x)-8.864\ 4$ $R^2=0.928\ 8$	$y_1=0.000\ 5x^2+0.012\ 5x-0.791\ 8$ $R^2=0.957\ 3$

由表 1 可见,试块表面温度的升高与时间的关系基本上有 3 类数学表达方法,分别是:线性式、对数式、多项式,其中 3.5 m 长碳绳单元对数拟合没有成功。这 3 类表达式的判定系数 R^2 均比较大,具有较高的精确度。在实际工作中,可以根据升温需

要,计算通电时间,以便于电脑自动控制,也有利于节约能源,降低成本。表 1 中, x 为通电时间, y_1 为升高温度。

将图 5 的曲线进行数值拟合,求得试块内外温差与通电时间关系式,见表 2。其中 y_2 为温度差。

表 2 试块内外温度差与通电时间关系

Tab. 2 Relation between temperature difference between interior and external of test block and conduction time

单元碳绳长度/m	多项式拟合
2.5	$y_2=-0.409\ 3x^2+8.362\ 7x+1.185\ 6,R^2=0.973\ 6$
3.5	$y_2=-1\times10^{-7}x^6+2\times10^{-5}x^5-0.001\ 6x^4+0.058\ 2x^3-1.081\ 5x^2+9.285\ 9x+0.496\ 2,R^2=0.974\ 6$
4.5	$y_2=6\times10^{-7}x^5-0.000\ 1x^4+0.007\ 4x^3-0.228\ 8x^2+3.148\ 4x+0.458\ 7,R^2=0.974\ 3$
5.5	$y_2=-4\times10^{-8}x^6+9\times10^{-6}x^5-0.000\ 7x^4+0.024\ 7x^3-0.468\ 4x^2+4.195\ 2x+0.602\ 9,R^2=0.975\ 1$
6.5	$y_2=-7\times10^{-9}x^6+1\times10^{-6}x^5-6\times10^{-5}x^4+0.000\ 9x^3+0.009\ 1x^2+0.149\ 6x+1.090\ 2,R^2=0.878\ 4$

由表 2 可见,试块内外温差与通电时间关系式可以采用多项式拟合,相关系数均比较大,具有较高

的精确度。在实际工作中,可以根据升温需要,计算通电时间,控制预埋碳绳的沥青混凝土路面内外温

差,在保证正常融雪化冰的同时,能很好地保护路面结构和材料。

3.2 功率分析

试验的发热单元为电阻电路,实测碳绳电阻,计算发热功率和单位面积发热功率,结果见表 3 和图 7。

表 3 碳绳发热功率
Tab.3 Heating power of carbon rope

类型	碳绳长度/m	电阻/ Ω	试验发热功率/ W	单位面积发热功率/ $(W \cdot m^{-2})$
A	2.5	23.0	56.00	498.0
B	3.0	25.0	51.84	383.7
C	3.5	28.0	46.00	292.0
D	4.0	30.9	41.94	233.0
E	4.5	34.4	37.67	186.0
F	5.0	39.0	33.23	148.0
G	5.5	44.0	29.45	119.0
H	6.0	45.0	28.80	107.0
I	6.5	50.0	25.92	89.0
J	7.0	59.0	21.97	70.0

由表 3 和图 7 可知,随着发热单元碳绳长度的增加,其电阻逐渐增大,发热功率减小,单位面积的发热功率也减小。试验发热功率 y_3 与时间的数值拟合关系式为: $y_3=-33.317\ln(x)+87.529,R^2=0.995$;单位面积发热功率 y_4 与时间的数值拟合关系式为: $y_4=23.673x^2-312.4x+1113.6,R^2=0.992$;当碳绳长度为 2.5 m 时,其电阻为 23 Ω ,发热功率为 56 W,单位面积发热功率为 498 W/m^2 。当碳绳长度为 3.5 m 时,其电阻为 28 Ω ,发热功率为 46 W,单位面积发热功率为 292 W/m^2 。

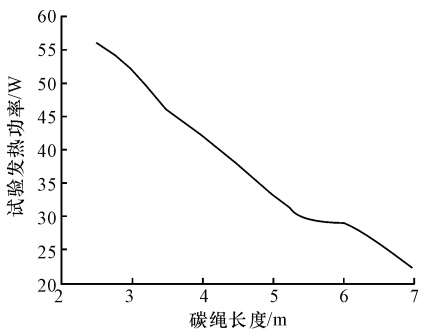
3.3 用电分析

以矮寨大桥为例,若铺设 2 个车道(双向),每个车道仅在轮迹带下铺宽 75 cm,则全桥设计的发热铺设净面积为 $0.75 \times 1\,000 \times 2 \times 2 = 3\,000\,m^2$ 。按照表 3 相关参数,可以依次计算不同碳绳发热耗电,见表 4 和图 8。

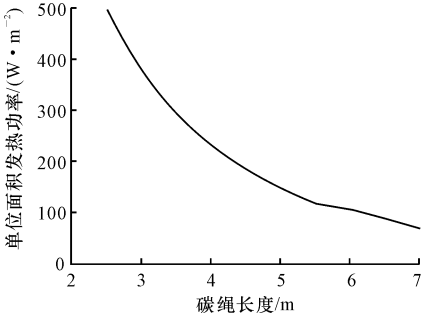
由表 4 和图 8 可知,随着发热单元碳绳长度的增加,其电阻逐渐增大,耗电量减小。耗电量 y_5 与碳绳长度 x_1 的数值拟合关系式为: $y_5=70.894x_1^2-936x_1+3\,337.7,R^2=0.992$ 。对于 2.5 m 长碳绳发热单元,其碳绳长度为 2.5 m,耗电量为 1 493 $kW \cdot h$ 。对于 3.5 m 长碳绳发热单元,耗电量为 876 $kW \cdot h$ 。

3.4 设计建议

中国地域辽阔,跨越的气候带众多,降雪情况复杂。根据《公路自然区域标准》规定,雪害区域主要



(a) 试验发热功率



(b) 单位面积发热功率

图 7 发热功率与碳绳长度关系曲线

Fig.7 Relation curve of heating power and carbon rope length

表 4 碳绳用电分析

Tab.4 Analysis of carbon rope electricity consumption

类型	碳绳长度/m	耗电/ $(kW \cdot h)$
A	2.5	1 493
B	3.0	1 151
C	3.5	876
D	4.0	699
E	4.5	558
F	5.0	444
G	5.5	357
H	6.0	321
I	6.5	266
J	7.0	210

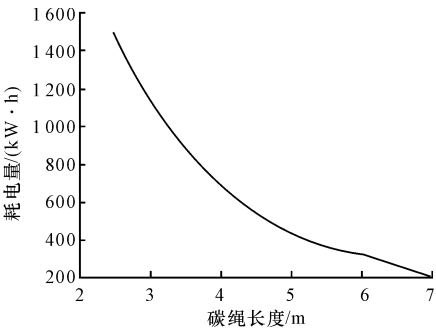


图 8 耗电量与碳绳长度的关系曲线

Fig.8 Relation curve between carbon rope length and power consumption

包括: I_1 、 I_2 、 II_1 、 II_{1a} 、 VI_1 、 VI_3 、 VI_4 、 VI_{4a} 、 VII_3 、 VII_4 、 VII_5 、 VII_6 、 VII_{6a} 。现行设计对路基路面的水损坏进行

了较多的研究,而对于路面的防冰抗雪尚关注不够。由于近几年气候的异常变化,传统意义上的南方地区,冬春季节也出现了较大的降雪,属于新问题需要解决。因此,有必要根据降雪的实际情况,确定路面的融雪除冰方案。

根据刘玉莲等的研究,中国的雪带包括:常年多雪带、常年降雪带、偶尔降雪带、永久无雪带^[12]。长江以南的滇南、四川盆地、江浙沿海等地区为永久无雪带。其他地区为雪带,可以设置预埋碳绳的沥青混凝土路面或桥面。根据长春地区某一天历史降雪,环境温度为-10℃~0℃,持续降雪8h,瞬态降雪量为7.5mm/h,高青等计算得到融雪平均热耗率为250W/m²左右,据此,发热单元碳绳长度为3.5m时能满足此种条件的融雪化冰要求^[13]。冰雪量比较小的地区可以选用其他耗电量更低的发热单元,推荐方案见表5。

表5 发热单元选择推荐方案

Tab. 5 Recommended schemes of heating unit selection		
单元长度/m	雪带	具体区域
2.5~3.5	常年多雪带	东北、内蒙古东部、新疆北部、青藏高原地区、秦岭北侧
3.6~4.5	常年降雪带	南疆、藏西、青海大部、甘肃、内蒙古西部、宁夏、山西北部、京津地区、山东、河南北部、四川大部
4.6~7.0	偶尔降雪带	新疆南部大部、西藏北部部分地区、内蒙古西部部分地区、山西南部、河北西部、江苏、两湖大部、江西、安徽、四川大部、黔南、两广北部

根据涂曦等的研究,路面融雪化冰系统需要提供足够的热量使雪融化成水,并能满足传导、蒸发、对流、辐射所需要的热量,主要受5个因素影响:降雪量、气温、风速、空气相对湿度、路面无雪覆盖面积占总面积的比例^[14]。热功率 Q 计算式为

$$Q=K\{-0.52ST_a+85S+A_r[\alpha T_a+5.443\ 2\times 10^{-8}(273^4-T_a^4)+1.2\times 10^4h_m(100-\varphi)]\}$$

式中: Q 为单位面积融雪化冰所需热输出功率(W/m²); K 为安全富余系数,取值1.0~2.0; S 为降雪量(mm/h); T_a 为空气温度(℃); A_r 为路面无雪覆盖面积占总面积的比例; α 为换热系数(W/(m²·℃)); h_m 为传质速率(m/s); φ 为空气相对湿度(%)。

表5中的推荐方案可作为初选之用,具体设计时采用 Q 计算公式进行优化。根据所在区域近年30年的10场最大降雪量的平均天气条件作为降雪量、气温、风速、空气相对湿度的设计标准值。实际工作中,可通过调节电压或电流调整热输出功率。

工程设计中,可将优化选择好的碳绳单元并联连接,预埋于上面层的沥青混凝土中。沥青的导热系数为0.062W/(m·K),实际工程中预埋碳绳沥青混凝土是上面层,中面层和下面层的沥青混凝土可作为绝热层,减少热量向下传导。实际路面中通过埋设碳绳产生热量融雪化冰时,受环境(风、温度)的影响会大一些。与车辙板预埋碳绳融雪化冰相比,车辆轮胎的碾压可能加快融雪化冰过程。

同一地区,由于风速、环境温度、降雪量等因素不同,所需要的融雪化冰热量也不同,这是一个非常复杂的问题。在实际操作中,可以进行有针对性的设计,埋设测风、测温、测雪探头,在适时检测这些因素的基础上,调控发热系统的输出功率,以满足关键路段或桥面融雪化冰的需要。

4 结 语

(1)碳绳发热性能良好,沥青混凝土中埋设碳绳能起到较好的发热效果,表面升温速度较快,发热稳定。

(2)通电状态下,随着时间的延长,试件表面温度有持续上升趋势。单元碳绳越短,升温越快,试块表面温度也越高。

(3)断电后,在人工风及环境强降温条件下,试块表面降温非常缓慢,表明沥青混凝土内部温度较高,具有良好的保温性能。

(4)预埋碳绳导电发热升温与时间有良好的数学关系,且相关性较好,可以预测升温,便于实现自动化控制,有利于保护路面材料和结构安全。

(5)实际工程中应用时,要根据所在区域的自然地理及降雪条件进行设计,并可通过调节电压或电流来调控输出功率。

参考文献:

References:

[1] 喻文兵,李双洋,冯文杰,等.道路融雪除冰技术现状与发展趋势分析[J].冰川冻土,2011,33(4):933-940.
YU Wen-bing,LI Shuang-yang,FENG Wen-jie,et al. Snow and ice melting techniques of pavement:state of the art and development tendency[J].Journal of Glaciology and Geocryology,2011,33(4):933-940.(in Chinese)
[2] 张洪伟,韩森,张丽娟,等.盐化物沥青混凝土抑制结冰与融雪试验[J].长安大学学报:自然科学版,2011,31(2):17-20.

- ZHANG Hong-wei, HAN Sen, ZHANG Li-juan, et al. Antifreezing and snow melting of MFL modified asphalt concrete[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(2): 17-20. (in Chinese)
- [3] 唐祖全, 李卓球, 钱觉时. 碳纤维导电混凝土在路面除冰雪中的应用研究[J]. 建筑材料学报, 2004, 7(2): 215-220.
- TANG Zu-quan, LI Zhuo-qiu, QIAN Jue-shi. Application of carbon fiber reinforced conductive concrete for melting ice and snow on road surface[J]. Journal of Building Materials, 2004, 7(2): 215-220. (in Chinese)
- [4] 王虹, 吴少鹏, 陈明宇, 等. 传导沥青混凝土的融雪化冰试验研究及数值分析[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(7): 90-93.
- WANG Hong, WU Shao-peng, CHEN Ming-yu, et al. Experimental research and simulating analysis of conductive asphalt concrete used to melting ice and snow[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(7): 90-93. (in Chinese)
- [5] 张永健, 袁玉卿, 杨玲. 矮寨特大桥融雪防冰电发热沥青混凝土试验研究[J]. 中外公路, 2011, 31(6): 29-32.
- ZHANG Yong-jian, YUAN Yu-qing, YANG Ling. Experimental study of electric heating asphalt concrete preventing snow-melt on Aizhai bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2011, 31(6): 29-32. (in Chinese)
- [6] 马世宁, 刘晓军, 张元龙. 碳纤维导电混凝土道面机场除冰雪的应用研究[J]. 路基工程, 2011, 29(3): 182-184.
- MA Shi-ning, LIU Xiao-jun, ZHANG Yuan-long. Application study on snow-ice melting for airport carbon fiber conductive concrete pavement[J]. Subgrade Engineering, 2011, 29(3): 182-184. (in Chinese)
- [7] 李炎锋, 武海琴, 王贯明, 等. 发热电缆用于路面融雪化冰的实验研究[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(3): 217-222.
- LI Yan-feng, WU Hai-qin, WANG Guan-ming, et al. Experimental study on the electrical road heating system for snow melting[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006, 32(3): 217-222. (in Chinese)
- [8] 车广杰. 碳纤维发热线用于路面融雪化冰的技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- CHE Guang-jie. A study of applied technology in deicing and melting snow for road surface by carbon-fiber electrical heating wire[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [9] 陈龙, 孙明清, 李滨, 等. 碳纤维格栅混凝土电热路面的化冰试验研究[J]. 公路, 2010, 55(4): 175-179.
- CHEN Long, SUN Ming-qing, LI Bin, et al. Experiment research on electric heating deicing of carbon fiber grating concrete pavement[J]. Highway, 2010, 55(4): 175-179. (in Chinese)
- [10] 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): 142-144.
- ZHAO Hong-ming, WU Zhi-min, CHE Guang-jie. Interval design of carbon fiber heating wire for pavement deicing[J]. Concrete, 2010(3): 142-144. (in Chinese)
- [11] 李洪磊, 顾康强, 岑国平. 自发热技术在机场道面融雪化冰中的应用研究[J]. 路基工程, 2011, 29(1): 78-80.
- LI Hong-lei, GU Qiang-kang, CEN Guo-ping. Application study of self-heating technology in snow-ice melting on airport pavement[J]. Subgrade Engineering, 2011, 29(1): 78-80. (in Chinese)
- [12] 刘玉莲, 任国玉, 于宏敏. 中国降雪气候学特征[J]. 地理科学, 2012, 32(10): 1176-1185.
- LIU Yu-lian, REN Guo-yu, YU Hong-min. Climatology of snow in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(10): 1176-1185. (in Chinese)
- [13] 高青, 刘研, 林密. 道路融雪地能利用热循环基本性能模拟分析[J]. 公路, 2009, 54(7): 350-354.
- GAO Qing, LIU Yan, LIN Mi. Simulation analysis of basic performance of road hydronic ice-snow melting by earth energy[J]. Highway, 2009, 54(7): 350-354. (in Chinese)
- [14] 涂骥, 陈辉, 吴少鹏, 等. 电沥青混凝土融雪化冰热输出功率计算方法[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(13): 37-40.
- TU Huan, CHEN Hui, WU Shao-peng, et al. Calculating method for heat output power based on removing snow and ice of conductive asphalt concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(13): 37-40. (in Chinese)