

## 桥面铺装内置碳纤维发热线施工技术研究\*

伍小永<sup>1</sup>, 杨霞燕<sup>1</sup>, 陈丹<sup>1</sup>, 张恺<sup>2</sup>

(1.南昌高速公路有限公司, 江西南昌 330004; 2.江西省交通科学研究院, 江西南昌 330200)

**摘要:**以南昌市南外环高速公路新建项目的桥梁工程试验段为工程背景,采用内置并联式碳纤维发热线对桥面铺装进行融雪除冰,提出了桥面铺装内置碳纤维发热线施工技术要求,分析了其应用情况。结果表明,在试验时气候环境条件下预热 20 h 后,5 cm 发热线布置间距区域的桥面温度比 10 cm 发热线布置间距区域的桥面温度上升更快;桥面结构具有一定的保温效果,积聚在桥面内部的热量不易全部散失,通过这种加热后效作用对桥面进行融雪化冰可节约电能;在气温低、大雪和大风情况下,需提高碳纤维发热线铺装功率,推荐铺装功率不低于 500 W/m<sup>2</sup>。

**关键词:**桥梁;桥面铺装;碳纤维发热线;施工技术

中图分类号:U445.7

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2019)04-0120-05

融雪剂通过降低冰点来融雪,但目前使用的融雪剂中,降低冰点值最低的氯化钙也只能用于-15℃的情况,气温低于-15℃时采用现有融雪剂已不能将冰雪融化。而碳纤维发热线融冰系统可通过调节输入电流适应更广的环境条件,它根据当地的气象条件、不同的道路结构计算出铺装功率,随气温和风速变化通过系统通断将上表面温度控制在一个设定值,非常有针对性。因此,从长远来看,碳纤维发热线融雪系统具有较好的社会效益。

南昌市南外环高速公路起于南昌东外环高速公路塔城互通,终于西外环高速公路。全长 35.802 km,设计速度 100 km/h,双向六车道,路基宽度为 33.5 m。该文结合该项目桥梁工程试验段开展桥面布设碳纤维线的电热法防冰雪施工技术应用,旨在寻求一种更安全、环保、施工方便的防冰方法,全面提升道路抵抗灾害天气的能力,提高行车安全性,并为南方季节性冰冻高速公路工程建设提供指导。

## 1 试验路铺装

### 1.1 发热线布置

基于室内试验中各因素对砵板升温效果的影响规律,选择 5、10 cm 2 种碳纤维发热线布设间距,埋深均为 3 cm,铺设两段相邻的桥面。由于该地区冬季温度低、风速大,为达到较好的升温效果,提高融雪效果,在保证发热线布设参数和输入电压不变的情况下,选择 36k 碳纤维发热线增大铺装功率。发

热线布置见图 1。

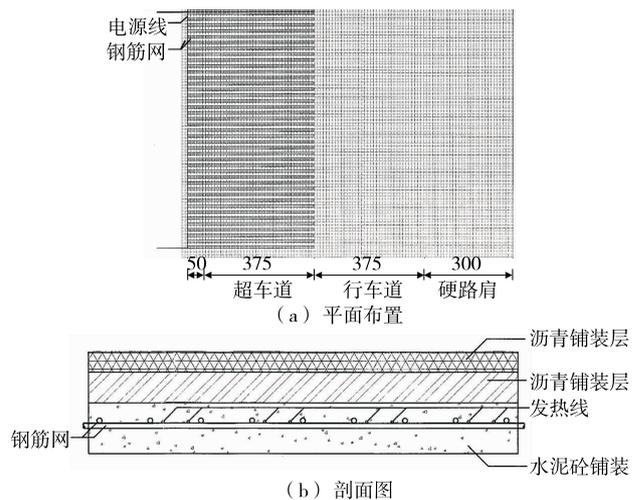


图 1 发热线布置示意图(单位:cm)

### 1.2 砵配合比

在试验段铺装过程中,考虑到隔热材料成本较高,且分层浇筑不同配合比砵时,为保证上下层砵的连续浇筑需增加额外的拌和设备或储存设备,碳纤维发热线的上覆层材料和下层材料均选择相同配合比的普通砵。各结构层砵配合比见表 1~3。

表 1 C50 水泥砵的配合比

原材料	比例/%	原材料	比例/%
水泥	19.8	水	6.5
砂	24.9	减水剂	0.5
碎石	48.3		

\* 基金项目:江西省交通运输厅科技项目(2016C0007;2014C0011)

表2 AC-20 沥青砼的配合比

集料粒径/mm	比例/%	集料粒径/mm	比例/%
15~20	24	3~5	4
10~15	22	0~3	26
5~10	21	矿粉	3

表3 SMA-13 沥青砼的配合比

集料粒径/mm	比例/%	集料粒径/mm	比例/%
10~15	60	0~3	13
5~10	18	矿粉	9

### 1.3 材料与设备

(1) 碳纤维发热线。采用 24k 或 6k 单丝数量的碳纤维发热线,线功率根据具体设计要求确定,其性能指标符合《碳纤维红外电热线》的规定,且具有产品合格证。碳纤维发热线外保护采用 PVC 加铠装的方式(见图 2)。

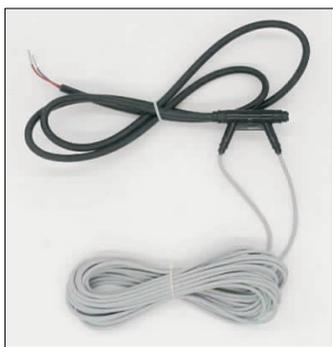


图2 并联式铠装碳纤维发热线

(2) 温度传感器。采用 JMT-36B 电阻式温度传感器,其为半导体类电阻型温度传感器,精度高,稳定性好。安装前对其进行标定。

(3) 结冰传感器。采用 JCJ-1600 结冰在线监测传感器,其采用独特的电容检测技术及电容、温度等多参数融合算法,通过检测监测面的不同物质状态(结冰、结冰厚度、积水等条件下的电容值),并集成温度检测及补偿技术进行结冰厚度检测,具有构造简单、安装方便、抗干扰能力强等特点,可用于高速公路、机场道路、桥面等结冰监测,是智能交通、智慧城市等物联网应用的重要解决方案。其技术指标见表 4。

(4) 施工设备。主要施工设备及数量见表 5。

## 2 施工工艺

桥面铺装内置碳纤维发热线的施工工艺流程为施工准备→钢筋网架设→碳纤维发热线布设→电源

表4 JCJ-1600 结冰传感器的技术参数

项目	参数值
检测参数	结冰、结冰百分比、干燥、温度
量程	覆冰 0~100%
分辨率/%	1
检测精度/%	5
电源电压/VDC	5~24
功率/W	<0.4
灵敏度/°C	0.4
通信方式	RS485 MODBUS
温度输出/°C	-40~85
结冰测试温度范围/°C	-20~85
外形尺寸/mm	34×20
防护等级	IP67

表5 主要施工设备及其数量

机具名称	数量
三辊轴摊铺机/台	1
平板振捣器	根据需要确定
沥青砼摊铺机	根据需要确定
压路机	根据需要确定
焊接器	根据需要确定
冲击钻/台	1
开槽机/台	1
数字万用表/台	1
500 V 兆欧表/台	1
数据采集仪/台	1

接线和套护管→水泥砼浇筑→沥青砼摊铺、压实→智能温控系统安装。

(1) 施工准备。1) 施工图纸及其他技术文件齐备;2) 对施工人员进行安全技术交底;3) 桥梁主体工程结束并验收合格;4) 材料、施工机具等准备就绪,能保证正常施工;5) 碳纤维发热线外观质量和电热性能验收合格;6) 施工现场设置临时用电设施;7) 桥面清理干净,整体平整,局部凹凸与整体平整度之差不得超过 15 mm;8) 桥面无杂物,多余钢筋等金属物清除干净;9) 施工现场具备作业空间,满足施工需要;10) 施工现场环境温度低于 5 °C 时不宜施工。

(2) 钢筋网架设。按照碳纤维发热线布设高度要求架设钢筋网,钢筋网高度不超过水泥砼铺装层的设计标高。为确保钢筋网的架空高度,在钢筋网下每间隔一段距离设置支撑钢筋。钢筋网必须牢固,验收合格。

(3) 碳纤维发热线布设。采用扎丝将碳纤维发

热线按 U 形走向绑缚在钢筋网上,宜布设在钢筋侧面或底部(见图 3),布设间距以 5~10 cm 为宜,具体根据设计铺装功率确定。碳纤维发热线绑扎紧密牢固,绑扎间距不超过 20 cm。铺设应美观、平直,最小弯曲半径为 5 倍发热线直径,不允许摔打碳纤维发热线。从碳纤维发热线铺设到水泥砼浇筑前,严禁机械设备碾压、施工人员穿硬鞋踩踏,以免损坏碳纤维发热线的绝缘层及接线端子导线等附件。发热线布设完成后,用数字万用表测试每一路的实际阻值,校核电阻系统公差,用 500 V 兆欧表测量发热线的绝缘电阻,确保所有发热线无断路、短路现象。



图 3 碳纤维发热线布设

(4) 电源接线和套护管。将接入电源控制柜的电源线穿过桥梁防撞墙上的预留孔引至铺设好的碳纤维发热线处,穿过预留孔的电源线需套入保护管内,管内严禁有接头。电源线与碳纤维发热线通过接线盒连接(见图 4)。接线完成、水泥砼浇筑前,再次检查各组发热线的标称电阻和绝缘电阻,如施工过程中造成发热线损坏及时进行处理。



图 4 电源接线和套护管

(5) 水泥砼浇筑。碳纤维发热线和温度传感器安装完成,用万用表检查并经通电检验合格(每根发热电缆都发热)后开始浇筑砼。砼浇筑时,施工人员穿软底胶鞋,水泥砼输送泵放料尽可能贴着桥面,防止冲断或冲散碳纤维发热线。铺设水泥砼层时铺垫木板,严禁使用手推车和其他机械运输工具直接进入铺设面,防止压伤、损坏碳纤维发热线,切忌动作粗鲁、大力强夯。水泥砼摊铺采用三辊轴摊铺机,确

保砼层厚度达到设计要求。水泥砼振捣采用表面振捣器,严禁采用插入式振捣器(见图 5)。振捣完成后立即检查各组发热线的标称电阻和绝缘电阻,如施工过程中造成发热线损坏,挖除损坏发热线处的砼,根据情况修复或更换已损坏的发热线。砼铺设完成后进行养护,养护期满后再次检查碳纤维发热线的标称电阻和绝缘电阻。



(a) 浇筑

(b) 人工浇捣

图 5 水泥砼浇筑

(6) 沥青砼摊铺。按设计要求进行沥青砼摊铺、压实。养护期满后进行通电升温测试,升温时间 48 h,检测系统是否能正常工作。需注意的是,测试前,先测量电源电压是否符合系统要求(200~230 V),符合要求才可进行测试。

(7) 智能温控系统安装。在桥面钻一个深 2 cm 的孔洞(尽量位于发热区域中心位置,不得在发热桥面区域边缘钻孔),将温度传感器感应端头固定在孔洞中。在桥面刻一条能敷设温度传感器信号传输线的线槽,将温度传感器输出端引出桥面与温控仪相接,再用沥青砂浆填封线槽。由温控仪输出端接入交流接触器,实现根据温度传感器反馈的桥面温度自动控制电源的开关状态。温控系统安装完成后进行测试,确保系统能正常工作。

### 3 工程应用情况及推广应用前景

在南昌南外环高速公路上实施碳纤维发热线的过程中,严格按照施工工艺要求,合理组织安排人员和设备,控制施工质量,施工各项指标均满足设计和规范要求,竣工验收合格。

2016 年 1 月 20 日上午 10 点首次开启通电设备持续加热,进行桥面融雪化冰试验。21 日早上 7 点开始下雪,此时桥面已预热 20 h,从此时开始每隔 2 h 监测桥面温度和实时融雪化冰效果。现场环境温度为 0℃,风速 1 级,无积雪。监测结果见表 6。

表6 桥梁试验段温度监测结果对比(无积雪)

时刻	无发热线下监测温度/℃			5 cm 间隔发热线下监测温度/℃			10 cm 间隔发热线下监测温度/℃		
	水泥砼 铺装层	沥青砼 下面层	沥青砼 上面层	水泥砼 铺装层	沥青砼 下面层	沥青砼 上面层	水泥砼 铺装层	沥青砼 下面层	沥青砼 上面层
7:00	4.6	2.4	2.1	11.5	6.5	3.9	10.3	6.2	3.1
9:00	4.8	2.0	1.7	11.6	7.1	3.8	10.6	6.5	2.8
11:00	4.1	1.9	2.7	11.7	6.5	4.1	10.3	5.9	4.1
13:00	4.1	3.2	2.9	11.7	7.1	5.0	10.3	6.7	4.3
15:00	4.2	3.4	3.1	12.0	7.4	5.2	10.5	7.0	4.8
17:00	4.4	3.8	3.3	12.3	7.7	5.4	10.8	7.3	5.4

由表4可知:1) 在无发热线的情况下,与桥梁板相接的水泥砼铺装层温度较稳定,在10 h监测时间内,温度相差最大为0.7℃;与外界大气直接接触的沥青砼面层温度变化幅度较大。2) 在有发热线的情况下,随着加热时间的增加,水泥砼铺装层温度稳定上升,沥青砼面层温度波动较大,但也呈整体上升趋势,这是因为沥青砼面层温度受外界环境温度影响大。在当时气候环境条件下预热20 h后,10 cm发热线布置间距区域的桥面从下至上各结构层温度比未布置发热线的一般桥面温度分别提高5.7、3.8和1℃,5 cm发热线布置间距区域的桥面从下至上各结构层温度比未布置发热线的一般桥面温度分别提高6.9、4.1和1.8℃,5 cm发热线布置间距区域的桥面温度比10 cm发热线布置间距区域的桥面温度上升更快。9:00—11:00加热期间,布置发热线的桥面沥青砼下面层和水泥砼铺装层温度降低,这是因为7:00—9:00期间大气温度显著降低导致桥面降温速度比加热升温速度快,沥青砼上面层首先降低温度,沥青砼下面层温度和水泥砼铺装层温度先后延迟降温。

由于当天降雪较小,全路无积雪成冰,现场看不出融雪化冰效果。19:00时关闭设备,停止加热。

次日即1月22日开始下大雪,在早上8:00重新开启设备加热,从此刻开始每隔2 h监测桥面温度和实时融雪化冰效果。现场环境温度为0℃,风速为2级,桥梁路肩位置已积大量冰渣。由于桥面在经历33 h加热仅停止加热13 h后又重新启动加热,在停止加热期间,之前桥面加热获取的热量尚未全部散失,导致刚开始加热时布置发热线区域的桥面温度仍然比没有布置发热线的桥面区域温度高。由于当天气温较低,雪较大,早上8:00时未布置发热线的桥面路肩处已积累大量冰渣,而布置发热线桥面路肩处完全没有冰渣,现场融雪化冰效果见图6,监测结果见表7。



图6 现场融雪化冰效果

表7 桥梁试验段温度监测结果对比(有积雪)

时刻	无发热线下监测温度/℃			5 cm 间隔发热线下监测温度/℃			10 cm 间隔发热线下监测温度/℃		
	水泥砼 铺装层	沥青砼 下面层	沥青砼 上面层	水泥砼 铺装层	沥青砼 下面层	沥青砼 上面层	水泥砼 铺装层	沥青砼 下面层	沥青砼 上面层
8:00	3.4	2.8	1.5	7.3	4.8	2.6	6.9	4.0	2.4
10:00	3.3	2.5	1.9	6.9	4.6	2.4	6.4	3.9	2.4
12:00	3.4	2.2	3.3	6.7	4.5	3.9	6.2	4.1	3.6
14:00	3.4	2.3	3.0	6.7	4.5	3.7	6.2	4.1	3.5
16:00	3.6	3.0	2.6	6.5	4.6	3.3	6.0	4.2	3.1
18:00	3.4	2.9	1.0	6.1	4.2	1.7	5.7	3.7	1.7

由图6可知:桥面结构具有一定的保温效果,积聚在桥面内部的热量不易全部散失,桥面在停止加热的较长一段时间内仍具有融雪化冰的作用,通过这种加热后效作用对桥面融雪化冰可节约电能。

由表7可知:加热过程中,桥面结构层内部温度呈下降趋势,这是因为持续下雪,而桥面融化冰雪需消耗大量热量,加上风速较大使桥面热量散失较快,导致桥面损失的热量比通过碳纤维发热线加热获取的热量多。因此,在气温低、大雪和大风情况下需提高碳纤维发热线铺装功率。试验段桥面5 cm布置间距的铺装功率为360 W/m<sup>2</sup>,10 cm布置间距的铺装功率为180 W/m<sup>2</sup>,根据现场气候条件,推荐铺装功率不低于500 W/m<sup>2</sup>。另外,通过提前预热方式可在恶劣气候环境下达到融雪化冰效果。

#### 4 结语

南昌市南外环高速公路桥梁试验段采用内置并联式碳纤维发热线对桥面铺装进行融雪除冰取得了较好的效果。与同类技术相比,该技术的施工方法简单、实用,碳纤维发热线存活率高,融雪化冰效果明显,能实现智能控温防止桥梁积雪结冰,节约能源和人工费,经济效益明显。且其施工过程对周围环境不会造成不良影响,社会效益好。

(上接第119页)

与预埋件连接位置;最大竖向位移为14.0 mm,位于横向分配梁端部。工况2下上横梁施工支架主要构件的强度和变形均满足设计及规范要求。

#### 4 结论

(1) 在空载和满载情况下,该桥上横梁施工支架主要构件的强度和变形均处于安全状态,满足设计及规范要求。

(2) 空载状态下最大应力出现在扶墙杆根部,最大竖向位移出现在主横梁端部;浇筑砼状态下最大应力出现在三角托架上部与预埋件连接位置,最大竖向位移出现在横向分配梁端部。施工中应加强相应部位与周边构件的联系,使支架整体结构受力更合理。

#### 参考文献:

[1] 胡雄伟.重庆寸滩长江大桥桥塔横梁支架设计与施工

#### 参考文献:

- [1] 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,2016,33(2).
- [2] 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,2016,33(2).
- [3] 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).
- [4] 罗新欣.内置碳纤维发热线的桥面融冰化雪技术研究[D].西安:长安大学,2015.
- [5] 徐庆军,郑弘.碳纤维发热线布设方案对桥面融冰化雪的影响研究[J].上海公路,2016(2).
- [6] 杨飞.碳纤维发热线用于道路除冰雪的技术研究[D].西安:长安大学,2014.
- [7] 陈鸿毅,梁增洁,陈绍辉,等.麻昭高速公路内置碳纤维发热线桥面融冰技术应用[J].公路交通科技:应用技术版,2015(4).
- [8] 杜宏伟,朱小青,张恺,等.碳纤维发热桥面融雪化冰性能预测模型[J].公路交通科技:应用技术版,2017(10).
- [9] 高明明.发热电缆布设方式对桥面融冰化雪的影响分析[J].现代交通技术,2018(2).

收稿日期:2018-09-27

[J].世界桥梁,2015,43(2).

- [2] 张德致,张敏,代皓,等.黄冈公铁两用长江大桥桥塔上横梁施工技术[J].桥梁建设,2013,41(3).
- [3] 易国良,余绍宾.天津海河大桥主塔施工关键技术研究[J].工业建筑,2012,42(增刊).
- [4] 龚美,陈广生,孙吉飏,等.乌江特大桥H型索塔施工过程力学特性与监控研究[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2017,33(4).
- [5] 马慧华,李兴华.鼓山大桥主塔上横梁支架设计与施工[J].科技风,2013(8).
- [6] 李陆平.高塔上横梁牛腿支架设计与施工技术[J].价值工程,2016,35(16).
- [7] 杨玉凤,李荣华.主塔上横梁高空施工技术[J].黑龙江交通科技,2018(2).
- [8] 凌李华.索塔横梁支架施工优化研究[D].长沙:长沙理工大学,2016.
- [9] JTG D60-2015,公路桥涵设计通用规范[S].
- [10] GB 50017-2003,钢结构设计规范[S].

收稿日期:2018-09-03