

# 碳纤维发热线桥面铺装融雪化冰试验研究

李荣清<sup>1</sup>, 王超<sup>2,3\*</sup>, 朱耀庭<sup>2,3</sup>, 杨暘<sup>1</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; 3.江西省道路材料与结构工程技术研究中心)

**摘要:** 为实现桥面铺装融雪化冰,提高冬季路网通行能力,对基于碳纤维发热线热融化法的桥面铺装融雪化冰效果进行了试验研究。试验结果表明:当发热线间距为 100 mm、发热功率为 400 W/m<sup>2</sup> 时,铺装表面在通电 60 min 左右开始融雪化冰,210 min 左右完成融雪化冰;300 min 之后铺装表面温度保持在 5.3 ℃ 左右,能够实现实时融雪化冰。

**关键词:** 碳纤维发热线; 桥面铺装; 融雪化冰; 室外试验

冬季气温较低,降雪、冻雨较为常见,路面容易积雪结冰。冰雪的存在一方面降低了路面的摩擦系数,严重时甚至危害人身和财产安全;另一方面使道路通行能力下降,对路网通畅造成压力。桥梁作为连接两地的重要纽带,其桥面完全暴露在空气中,不与土壤直接接触。与路基段相比,桥梁因其结构形式、地理位置等的不同,对融雪除冰的要求也不相同。目前,道桥融雪化冰技术主要有清除法和融化法两大类,清除法包括人工清除、机械清除等;融化法分为化学融化法、热融化法等。传统的人工清除、机械清除、融雪剂等融雪技术取得了一定的效果,但也存在操作复杂、成本高昂、污染环境等问题,故新型融雪化冰技术研究亟需开展。

近年来,国内外开展了大量地热能、红外加热、太阳能蓄热、导电混凝土自发热等热融化法的试验研究。如:王华军等进行了地热能道路融雪化冰试验研究,认为温度为 35~40 ℃ 的地热尾水可用于道路的融雪化冰;Zenewitz 等发现红外灯融雪化冰平均耗能仅为 75 W/m<sup>2</sup>;高一平进行了太阳能融雪系统集热能力和融雪能力的研究;Ramsey 等设计了一种发热电缆融雪化冰系统;Zhao 等对混凝土桥面板碳纤维发热融雪化冰进行了研究;张倩雯等利用 Ansys 软件对混凝土路面碳纤维发热线的融雪化冰性能进行了有限元法分析;袁玉卿等研究了碳纤维导电沥青混凝土的发热性能;张永健等研究了导电沥青混凝土桥面铺装的融雪

化冰效果。以上热融化方法均存在不足之处:地热能、太阳能蓄热管道铺设复杂、费用较高,不易维护;红外加热升温效果缓慢,且热量散失严重;导电沥青混凝土的导电性能不易控制,掺入的导电材料对沥青混合料的路用性能有不利影响。碳纤维发热线是一种新型发热材料,具有良好的发热性能、耐久性能,与沥青混合料的协同工作性能较好。该文采用内置碳纤维发热线,并模拟桥面铺装体系,对碳纤维发热桥面铺装的融雪化冰效果进行试验研究,为碳纤维发热线在桥面融雪化冰中的工程应用提供理论依据和技术支持。

## 1 材料与试验

### 1.1 发热线

采用沥青基碳纤维(PCF)发热线,外绝缘保护层为硅胶,其主要的性能指标如表 1 所示。

表 1 PCF 主要性能指标

丝束数/K	耐高温/℃	电阻/(Ω·m <sup>-1</sup> )	抗拉强度/MPa	抗拉弹性模量/GPa
36	<200	10~12	>3 500	230~430

### 1.2 试件制备

利用自制钢模,成型尺寸为 300 mm×300 mm×40 mm(长)的 AC-13 上面层、300 mm×300 mm×60 mm(长)的 AC-20 下面层和 300 mm×300 mm×

收稿日期:2019-04-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51508246);江西省工程技术研究中心计划项目(编号:20171BCD40017);江西省交通运输厅重点科技项目(编号:2014C0011,2016C0007)

作者简介:李荣清,男,高级工程师。

\* 通信作者:王超,男,硕士,E-mail: samedhi@126.com

100 mm(长)的 C30 水泥混凝土,以模拟桥面铺装体系,铺装结构如图 1 所示。为模拟路面真实压实情况,上下面层均采用大型轮碾成型仪碾压成型。

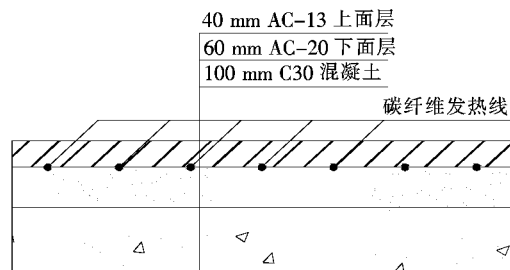


图 1 碳纤维发热线铺装结构示意图

试件制备方法:首先成型 C30 水泥混凝土,标准条件养护 28 d 后在其上洒布黏层油;之后利用大型轮碾成型仪在水泥混凝土之上成型 AC-20 下面层,碾压荷载为  $1 \times 10^5$  kN,在下面层表面刻槽布设碳纤维发热线并洒布黏层油;最后利用大型轮碾成型仪成型 AC-13 上面层,碾压荷载为  $1 \times 10^5$  kN。

### 1.3 试验方法

利用交流调压器控制输入电压、调节发热功率,利用高低温环境箱模拟低温结冰环境,利用多通道温度采集仪、温度传感器实时采集试件表面及内部温度,测试不同发热线间距、不同发热功率、积雪结冰环境下碳纤维发热线铺装的发热性能和融雪化冰效果。

## 2 结果与分析

### 2.1 发热线间距对发热性能的影响

3 种发热线间距试件的发热线布设形式、温度测点分布如图 2 所示。各试件表面温度为其表面 5 个温度测点的平均值。如,发热线间距为 100 mm 的试件,其表面温度为 B1~B5 这 5 个测点的平均值。试验前将试件置于  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  的环境箱中 4 h 以上,确保试件内外温度与环境温度一致,试验在  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  的环境箱中进行。调节输入电压,使各试件的发热线功率保持在  $18\text{ W/m}$ 。

各试件表面升温趋势如图 3 所示。从图 3 中可以看出:① 发热线间距越大,试件表面温度越低。间距为 80、100 和 120 mm 时,试件的表面温度分别稳定在 9.4、6.8 和  $5.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右;② 间距越小,升温速度越快。间距为 80 mm 和 100 mm 的试件 60 min 之内表面温度可达  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上,而间距为 120 mm 的试件需要 90 min 左右,升温速度较慢。考虑到发热线间距越小,其

布设难度越大,施工越复杂。为保证较快的升温速度,该文将室外试验中发热线间距定为 100 mm。

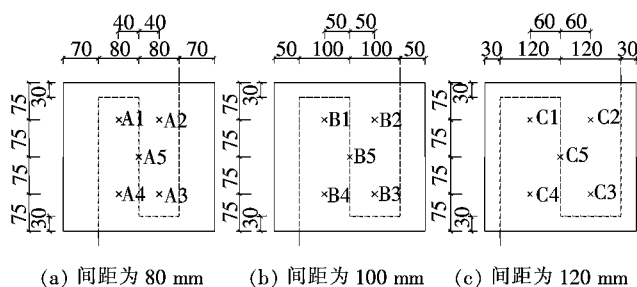


图 2 发热线及温度测点布设示意(单位:mm)

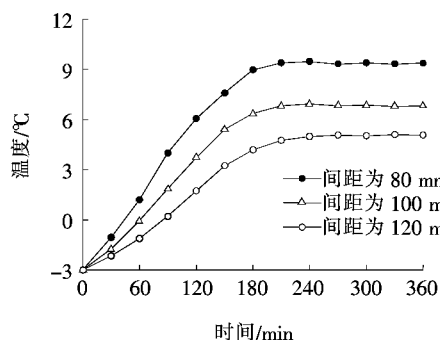


图 3 不同发热线间距下试件表面温度变化趋势

### 2.2 发热功率对发热性能的影响

试件采用 100 mm 的发热线间距,其温度测点布设如图 4 所示。图中 B1~B5 为试件表面的温度测点,b1~b5 为试件内部(发热线层)的温度测点,内部温度为 b1~b5 这 5 个测点的平均温度值。试验前将该试件置于  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  的环境箱中 4 h 以上,确保试件内外温度与环境温度一致,试验在  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  的环境箱中进行。调节输入电压,分别测试  $200$ 、 $400$ 、 $600\text{ W/m}^2$  3 种功率下试件的发热性能。

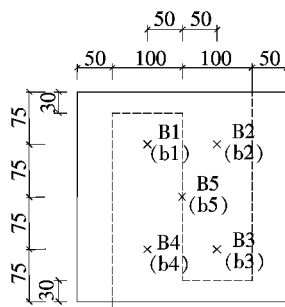


图 4 温度测点布设示意(单位:mm)

不同发热功率下试件表面、内部温度变化趋势如图 5 所示。从图 5 可以看出:发热功率越高,试件表面升温速度越快。不同发热功率下试件表面达到一定温

度所需时间如表 2 所示,从表 2 可以看出:发热功率为 400、600 W/m<sup>2</sup> 时,试件表面温度在 60 min 之内可达 2℃ 以上,能够满足实时融雪化冰的要求。

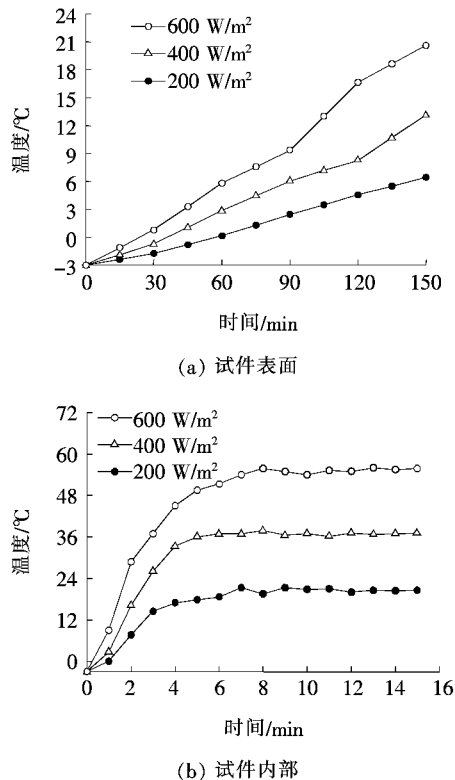


图 5 不同发热功率下试件温度变化趋势

表 2 试件表面达到一定温度所需时间

发热功率/ (W · m <sup>-2</sup> )	试件表面达到以下温度(°C)所用时间/min		
	0	2	5
200	57.62	84.03	126.98
400	36.14	52.90	80.03
600	23.81	37.26	55.12

由图 5(b)可知:发热功率越大,试件内部温度越高。发热功率为 200、400 和 600 W/m<sup>2</sup> 时,试件内部温度分别稳定在 20.5、37.0 和 55.6℃ 左右。考虑到过高的温度对沥青铺装的耐久性能有不利影响,且发热功率越大成本越高。为保障融雪化冰所需温度,该文将室外试验中发热功率定为 400 W/m<sup>2</sup>。

### 2.3 室外融雪化冰试验

发热线预埋在上面层与下面层之间,如图 1 所示。发热线间距为 100 mm,发热功率为 400 W/m<sup>2</sup>。试验在气温为 -2~0℃,风速为 0~3 m/s 的室外环境中进行。试验前在铺装表面均匀撒布 1 cm 厚的碎冰,再覆盖 4 cm 厚的积雪。

图 6 为室外融雪化冰过程中铺装表面温度变化趋势。

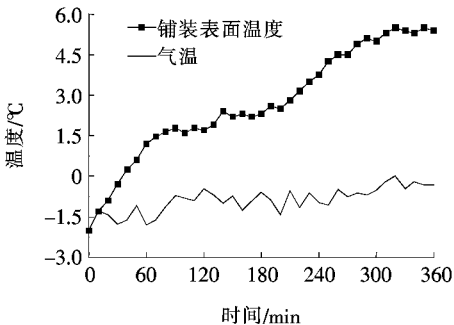


图 6 铺装表面温度变化趋势

从图 6 可以看出:试验开始后 60 min 内,铺装表面温度上升较快;60~210 min 铺装表面温度趋于平稳,说明发热线产生的热量被用于融雪化冰,铺装表面正在融雪化冰;210 min 时铺装表面温度继续上升,表明融雪化冰已基本完成;300 min 之后铺装表面温度不再升高,并维持在 5.3℃ 左右。图 7 为室外融雪化冰照片,其融雪化冰过程与上述分析结果一致。

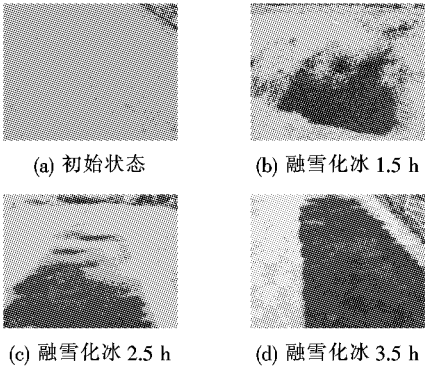


图 7 室外融雪化冰照片

### 3 结论

- (1) 在线功率相同的情况下,发热线间距越小,试件表面温升速度越快,发热线布设难度越大。
- (2) 在发热线间距相同的情况下,发热功率越大,试件内部温度越高。过高的温度不利于沥青混合料的耐久性,且功率越大,能耗越高。
- (3) 当发热线间距为 100 mm,发热功率为 400 W/m<sup>2</sup> 时,铺装表面在通电 60 min 后开始融雪化冰,210 min 左右完成融雪化冰;300 min 之后铺装表面温度保持在 5.3℃ 左右。碳纤维发热线桥面铺装的融雪化冰效果良好,能够满足实际应用条件。

# 聚酯纤维和振动搅拌工艺对水泥稳定碎石的 路用性能影响规律研究

房英锋

(中电建路桥集团有限公司,北京市 100089)

**摘要:**采用振动搅拌工艺对水泥稳定碎石进行搅拌加工,对比振动搅拌工艺与传统搅拌工艺对水泥稳定碎石强度性能的影响及改善机理。在振动搅拌成型工艺的基础上,分析聚酯纤维对水泥稳定碎石无侧限抗压强度、劈裂强度、干缩性能、温缩性能和均匀性的影响规律。试验结果表明:采用振动搅拌成型的水泥稳定碎石 28 d 无侧限抗压强度、劈裂强度比传统拌和成型试件分别提高了 21.6%、21.2%,干缩系数和温缩系数分别降低了 23.4%和 21.3%;除 7 d 劈裂强度指标外,聚酯纤维的掺入可有效改善水泥稳定碎石的各项路用性能,且最佳掺量范围为 0.6‰~0.8‰。

**关键词:**水泥稳定碎石;振动搅拌;聚酯纤维;强度;收缩系数

公路水泥稳定碎石半刚性基层普遍存在收缩开裂、均匀性差等问题,是公路基层产生诸多病害的主要原因之一。一般认为,通过工艺提升、外掺添加剂和设计优化等技术手段能够改善半刚性基层材料的强度、抗裂性能等,从而提高公路基层的路用性能和耐久性。目前相关研究认为:纤维能够对水泥稳定碎石具有增

强和增韧效应,掺加纤维是改善水泥稳定碎石路用性能方法之一;另外振动搅拌工艺可从宏观和微观层面上改善材料拌和过程中的均质性,从而提高强度和各项使用性能。

聚酯纤维材料化学稳定性好、强度高,同时具有良好的耐酸性能和抵抗非极性溶剂侵蚀的能力,是综合

## 参考文献:

- [1] 方恒亮,赵茂才,张海,等.基于有限元的水泥路面冰冻损伤机理[J].公路交通科技,2011(8).
- [2] 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(4).
- [3] 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(2).
- [4] 王华军,赵军.地热能道路融雪化冰过程实验研究[J].太阳能学报,2009(2).
- [5] Zenewitz J A. Survey of Alternatives to the Use of Chlorides for Highway Deicing, FHWA-RD-77-52[R]. Washington D.C.: Offices of Research and Development, Federal Highway Administration, 1977.
- [6] 高一平.利用太阳能的路面融雪系统[J].中外公路,1997(4).
- [7] Ramsey J W, Hewett M J. Updated Design Guidelines for Snow-Melting Systems[J]. ASHRAE Trans, 1999, 105(2): 1 055-1 065.
- [8] Zhao H, Wang S, Wu Z, et al. Concrete Slab Installed with Carbon Fiber Heating Wire for Bridge Deck Deicing[J]. Journal of Transportation Engineering, 2010, 136(6): 500-509.
- [9] 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).
- [10] 袁玉卿,许海铭,张永健.导电沥青混凝土发热性能实验研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2014(10).
- [11] 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(6).
- [12] 姜绍升,孙青松.化学类冻结抑制沥青路面融雪效果评价[J].中外公路,2012(1).
- [13] 邹孟秋.物理及化学作用综合融雪除冰沥青混合料研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2016.
- [14] 杨慧成.蓄盐材料制备及其除冰融雪研究[D].长安大学硕士学位论文,2014.

收稿日期:2019-09-09(修改稿)

作者简介:房英锋,男,大学本科,高级工程师.E-mail:2379382427@qq.com