

[文章编号] 1003-4684(2021)02-0056-05

# 机场道面碳纤维发热线融雪模型试验研究

邢嘉明, 肖衡林, 陈 智

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 为分析碳纤维发热线能够融化机场道面冰雪的可行性,通过在恒温实验室内制作内置碳纤维发热线的等比例机场混凝土道路模型,研究机场道面的温升规律。结果表明:提高发热功率,减小碳纤维发热线布置间距有利于高效融化道面冰雪,对比优选出间距 100 mm,发热功率为 237 W/m<sup>2</sup>的道面下碳纤维发热线布置参数。恒温室内测试设置环境为-5℃,发热功率为 237 W/m<sup>2</sup>,发热线布置间距为 100 mm,加热 2.5 h 试件温升最快稳定在 0℃左右且最终稳定在 6.6℃左右,能够保证试件道面上无冰雪堆积。

[关键词] 机场道面; 碳纤维发热线; 温升规律; 温度场; 融雪化冰

[中图分类号] TU473 [文献标识码] A

寒冷地区冬季,受到恶劣天气影响,机场因积雪结冰被迫关闭,造成经济效益的损失。冰雪覆盖滑行道道的标线,容易引起安全事故,并且滑行道内部温度变化会造成一定程度的结构损伤<sup>[1]</sup>。近年来在机场道面上普遍应用的融雪化冰方式有融雪剂法和机械除冰法<sup>[2]</sup>。化学法除冰雪方便易行,效果显著,但撒氯盐的方式经常需要后续的处理,容易腐蚀路面和污染环境。国内机场目前使用机械除雪的方式进行融雪化冰,高效除冰是机械方法的显著特点,该法对清除大量冰雪较为合适,缺点是费时费力<sup>[3]</sup>。

将电能转化为热能的自发热融雪化冰技术逐渐发展为学者的研究重点之一,主要有电热法<sup>[4]</sup>、地热法<sup>[5]</sup>、导电混凝土加热法<sup>[6]</sup>等。李荣清对碳纤维发热线应用在桥面施工进行了室内试验<sup>[7]</sup>。李春鸣研究连续式自发热机场道面的融雪化冰规律,在不同的发热功率和冰层厚度等条件下展开了室外融雪化冰试验<sup>[8]</sup>。武海琴、李炎锋等研究了碳纤维发热线的选型、埋深和发热线布置间距,通过碳纤维融雪化冰结合有限元分析方法对路面变化进行了研究,得出不同的温度条件下道面和结构层内部温度分布、升温规律<sup>[9]</sup>。赵宏明、车广杰等通过有限元研究了布置不同间距发热线的混凝土板表面温升的均匀性,并通过混凝土小板室内温升试验研究了混凝土板输入功率和温升的关系<sup>[10]</sup>。

因耗能较高造成碳纤维自发热融雪化冰技术在

国内外研究较少,国内暂无机场混凝土道路模型的制作,对于融雪化冰过程中各结构层内部的温度变化以及热量在垂直方向上的传导还未进行研究。基于此,通过在恒温实验室内制作机场混凝土大型模型试件,机场混凝土道面内部发热线通过接通外部电源,试件模型内部温度开始增加。利用融雪化冰原理,在混凝土试件各个结构层埋置测温探头以便于监测试件内部的温度变化情况和研究温升规律。

## 1 试验方案设计及监测系统组成

### 1.1 碳纤维发热线

此次试验所需的碳纤维发热线型号如:线材 24 K型,电阻 17 Ω/m,线材功率 28 W/m。最高工作温度为 100℃。

### 1.2 混凝土试件模型

根据《民用机场水泥混凝土道面设计规范》(MH5004-2009)与《民用机场飞行区水泥混凝土道面面层施工技术规范》(MH5006),试验试件为 1.2 m×1 m×0.85 m,标准是 4F 级别的机场跑道的混凝土板,土基为厚 200 mm 的压实土,土层压实度为 96%。垫层采用中砂,厚度为 150 mm。基层采用厚度为 300 mm 水泥混凝土,基层和面层水泥混凝土采用 P.O 42.5 水泥、沙、碎石、混凝土高效减水剂。面层厚度设 200 mm,道面配合比如表 1 所示。

[收稿日期] 2020-07-28

[基金项目] 国家自然科学基金(51808203);湖北省技术创新专项重大项目(2018AAA028);湖北省技术创新专项重大项目(2019AAA011)

[第一作者] 邢嘉明(1995-),男,河南平顶山人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为电热法融雪化冰技术

[通信作者] 陈 智(1988-),男,湖北黄冈人,工学博士,湖北工业大学讲师,研究方向为环境岩土工程

表 1 试件配合比表

砂	碎石粒径/mm		水泥 P.O 42.5	水	外加剂
	5~20	20~40			
574	590	880	330	135	6.6

1.3 试件制作方法

试件由上到下依次为面层、基层、垫层和土层,如图 1 所示。为了施工方便,混凝土试件在恒温室内浇筑完成,将碳纤维发热线埋置于混凝土试件中,通电后发热线传递热能。试件共设置两个发热层,道面 5 cm 和 10 cm 下分别埋置第一发热层和第二发热层。碳纤维发热线的长度为 10 m,布置方式选为 U 型,布置间距为 10 cm。



图 1 混凝土试件模型

1.4 监测系统组成

为保证试验顺利进行,采取视频监控和温度监测两部分来更好地监测试验状况。视频监控及时反映实验室内的情况,温度监测是在试件内部及表面均匀布置测点的位置进行实时的测温。视频设备采用 HIKVISION 监控摄像头,测温设备采用 LTM8871 型数字温湿度传感器,温度范围为  $-55^{\circ}\text{C} \sim +125^{\circ}\text{C}$ ,在  $-10^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$  范围内精度为  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。所有传感器传回的温度数据由 LTM8662 多功能数据采集控制模块进行处理后传到 PC 端进行实时记录。



1—碳纤维发热线;2—试验边界;3—测温点

图 2 试件立面图

为了能监测混凝土试件每一层结构的温度变化情况,测温点分为试件表面测温层和试件内部测温层。为探究温升规律,将 62 个测温点均匀地布置在试件表面及试件内部,如表 2 和图 3 所示。

1.5 试验方法及步骤

试验主要探究机场道面的温升规律、热传递及输入功率与混凝土试件温升的关系。对比不同加热

表 2 测温探头布置

层数	位置	探头数量	布置形式
第一层	混凝土试件道面	16	网格状均匀分布
第二层	距离试件表面层 5 cm	16	网格状均匀分布在发热线两侧
第三层	面层与基层之间	16	网格状均匀分布
第四层	基层与垫层之间	6	等间距纵向布置
第五层	垫层与土层之间	4	等间距纵向布置
第六层	土层中	4	等间距纵向布置

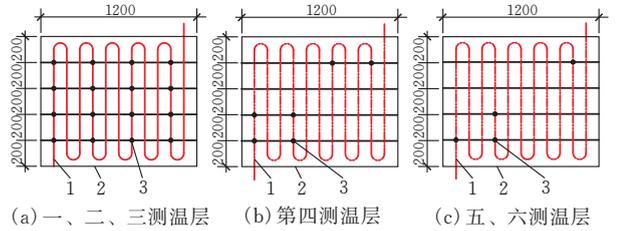


图 3 平面布置图

功率下温度变化曲线,将试验分为 S1, S2 和 S3。为模拟真实状况,在大型恒温实验室内设温度为  $-5^{\circ}\text{C}$ ,受外界环境影响,不能完全达到设定的温度值,将试验的温度误差控制在  $2^{\circ}\text{C}$  以内。将人工造雪机里的冰雪匀称地洒在试件道面上,厚度均为 10 mm。发热线的输入功率由输入电压的改变来进行控制,按照发热线电阻的最大规格来计算最大发热功率:发热线电阻为  $17 \Omega/\text{m}$ ,其最高承受 220 V 电压,根据公式计算得碳纤维发热线在电压 220 V 下的单位面积上最大发热功率 S1 为  $237 \text{ W}/\text{m}^2$ 。同理,输入电压分别为 S2:200 V, S3:180 V,对应的输入功率为 S2: $196 \text{ W}/\text{m}^2$ , S3: $158 \text{ W}/\text{m}^2$ 。

2 试验结果与分析

2.1 第一测温层温度分布规律

选第一测温层的南北方向为与发热线平行的板边,东西方向为与发热线垂直的板边,如图 3a 所示。试件平行边温度、垂直边温度、四角温度、中心温度均取同样的四个测温点,求平均值。如图 4 所示,三组实验的道面中心始终保持温度最高,板边其次,道面四个边角的温度最低,这是由于热传递在道面中心的效果最好,室内冷空气对其影响相对较小。板边和道面边角位于温度场的边缘,因为热辐射和热对流发生,故温度较低。

在刚开始加热时,各位置初始阶段温度相差在  $1^{\circ}\text{C}$  之内,在加热过程中,碳纤维发热线作为热源将温度逐渐向上传递给道面,道面整体温度变化趋势呈上升状。由图 4 可知,当 S3 加热至 20 h, S2 和 S1 加热至 14 h,试件整体升温速率由先快后慢开始趋于稳定状态。S1、S2 和 S3 的最高道面中心温度分别为  $6.66^{\circ}\text{C}$ 、 $4.49^{\circ}\text{C}$ 、 $3.67^{\circ}\text{C}$ ,道面边角温度为

2.36℃、1.02℃、0.64℃,即道面中心温度分别高出道面边角温度 65%、77%、112%,道面与发热线平行的板边温度分别为 2.83℃、2.64℃、2.06℃,高出对应道面边角温度 17%、61%、68%,道面与发热线垂直的板边平均温度分别为 5.39℃、2.76℃、2.09℃,高出对应边角温度 56%、63%、69%。由上述分析可得,在同一时刻,发热功率越大,整个道面发热越均匀,且温度更快趋于稳定。因为在同一时刻,发热功率大,整体可以抵抗环境温度变化的能力增强。

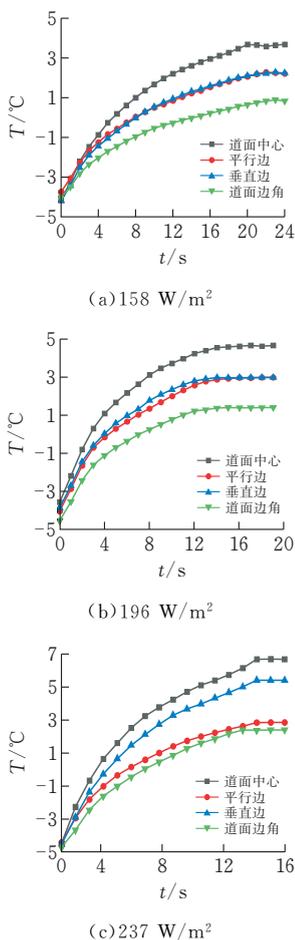


图4 道面层不同功率温度变化趋势

## 2.2 第二测温层温度分布规律

第二测温层上的测温探头布置于距离道面下方 5 cm 处,布置方式与第一发热层相同,共计 16 个测温点,均匀网格状布置。在 0~20 h, S3 温度整体呈上升状,升温速率先快后慢,20~24 h, S3 温升趋于稳定。S1 和 S2 加热至 14 h 达到最大温度,加热速率与 S3 一致。第二测温层 S1、S2、S3 的最高中心温度分别为 4.76℃、2.86℃、2.36℃,边角温度为 1.00℃、0.06℃、-0.20℃,即中心温度分别高出边角温度 79%、98%、101%。所取平行边的四个测温点平均温度分别为 2.60℃、1.63℃、1.16℃,高出对应边角温度 62%、96%、71%,垂直边的四个测温点平均温度分别为 2.90℃、1.75℃、1.25℃,高出对应边

角温度 66%、97%、117%。第二测温层整体平均温度上升值小于道面层,这是因为第二测温层热传递现象明显,大部分向上传递用于道面层融雪化冰,少部分向下传递,造成热量损失(图 5)。

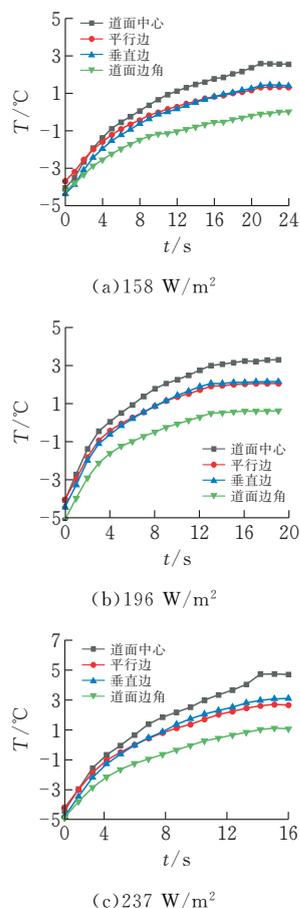


图5 第二测温层不同功率温度变化趋势

## 2.3 第三测温层温度分布规律

第三测温层的测温探头布置于面层与基层之间,布置方式与道面层和第二测温层相同。在浇筑基层时,因冷气进入,造成热量流失,故对第三测温层垂直边温升效果产生影响,温度变化趋势相比道面层和第二测温层较缓慢。温升趋势与前两层一致,如图 6 所示,在 0 时,第三测温层 S1、S2、S3 的中心温度分别为 -4.22℃、-4.51℃、-4.50℃,第 14 h, S1 和 S2 中心温度分别为 3.13℃、1.54℃,至 20 h, S3 中心温度为 0.97℃。同理,在 0 时,第三测温层 S1、S2、S3 的边角温度分别为 -3.84℃、-4.38℃、-4.39℃,第 14 h, S1 和 S2 边角温度分别为 -0.91℃、-0.14℃,至 20 h, S3 边角温度为 -0.38℃。第三测温层在温升趋于稳定时平均中心温度 S1、S2、S3 分别上升 7.35℃、6.05℃、5.47℃,平均边角温度分别上升 4.75℃、4.24℃、4.01℃。

## 2.4 四五六测温层温度分布规律

第四测温层位于基层和垫层之间,6 个测温探头等间距纵向布置,分析具有代表性的板中心和边

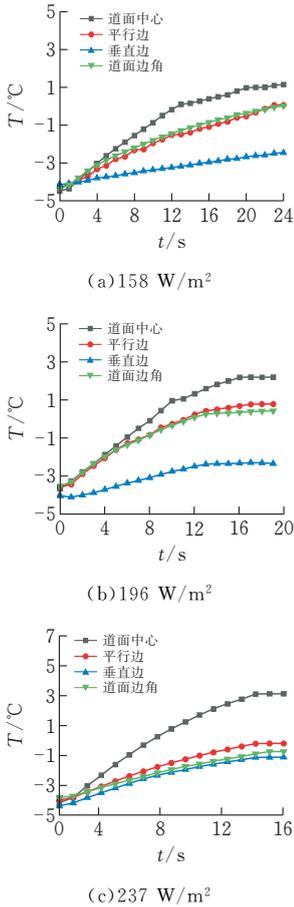


图 6 第三测温层不同功率温度变化趋势

角的温度变化(图 3b)。在起始阶段,第四测温层 S1、S2、S3 的中心温度分别为  $-4.03^{\circ}\text{C}$ 、 $-3.03^{\circ}\text{C}$ 、 $-4.13^{\circ}\text{C}$ ,第 14 h,S1 和 S2 中心温度分别为  $3.49^{\circ}\text{C}$  和  $1.72^{\circ}\text{C}$ ,第 20 h,S3 的中心温度为  $1.31^{\circ}\text{C}$ (图 7a)。同理,初始阶段,第四测温层 S1、S2、S3 的边角温度分别为  $-3.75^{\circ}\text{C}$ 、 $-3.19^{\circ}\text{C}$ 、 $-4.44^{\circ}\text{C}$ ,第 14 h,S1 和 S2 边角温度分别为  $1.72^{\circ}\text{C}$  和  $1.32^{\circ}\text{C}$ ,第 20 h,S3 的边角温度为  $0.75^{\circ}\text{C}$ 。第四测温层在温升趋于稳定时平均中心温度 S1、S2、S3 分别上升  $7.52^{\circ}\text{C}$ 、 $4.75^{\circ}\text{C}$ 、 $5.85^{\circ}\text{C}$ ,边角温度分别上升  $5.47^{\circ}\text{C}$ 、 $4.51^{\circ}\text{C}$ 、 $5.19^{\circ}\text{C}$ 。S1 加热 16h 温度升高  $7.53^{\circ}\text{C}$ ,只占整体温升的 0.1%,S2 和 S3 加热至 20 h 和 24 h 分别占整体温升的 0.2%和 1.9%。第五测温层位于垫层与土层之间,共计 4 个测温探头。第六测温层位于土层中,距离垫层底 10 cm 处,共计 4 个测温探头,第五测温层与第六测温层布置方式均为等间距纵向布置(图 3c)。在加热时中心和边角的温度逐渐上升,上升速度与一、二、三测温层相比较缓慢(图 7b)。一、二、三的测温层相比,第六温层的中心和边角温度的温升趋势缓慢(图 7c)。这说明距离发热线距离不同,受到的热量传递效果不同,一、二、三测温层距离发热线较近,整体发热均匀性好,在相同时间内,温升速率更快,四、五、六测温层距发热线较远,温升效果

相对比一、二、三测温层较差。

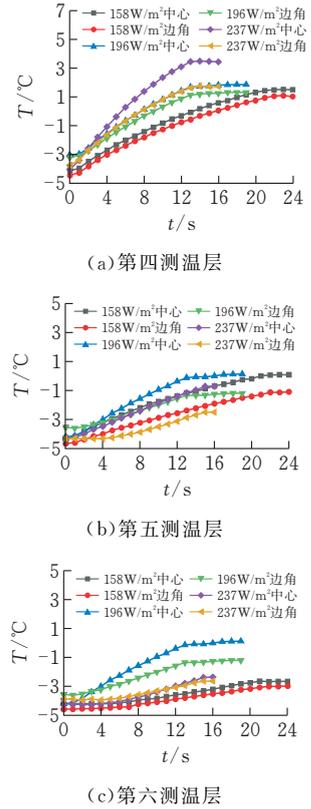
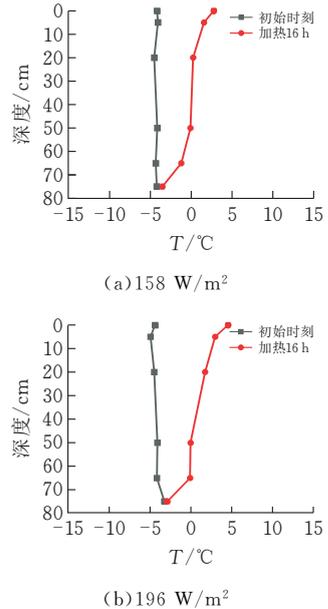


图 7 四五六测温层不同功率温度变化趋势

### 2.5 纵向不同深度温度分布规律

如图 8 所示,S1、S2 和 S3 加热至 15 h,试件整体温度均有所增加,当加热功率为 S3 时,道面层及道面下 5 cm、20 cm、50 cm 和 65 cm 处温度分别增加  $6.96^{\circ}\text{C}$ 、 $5.65^{\circ}\text{C}$ 、 $4.77^{\circ}\text{C}$ 、 $4.06^{\circ}\text{C}$ 、 $3.125^{\circ}\text{C}$  和  $0.69^{\circ}\text{C}$ 。显然道面处温升效果最好,这是因为道面距发热线较近,且道面整体均匀性好。当加热功率为 S1 和 S2 时,道面处温度分别增加  $9.93^{\circ}\text{C}$  和  $8.95^{\circ}\text{C}$ 。道面层融雪化冰顺利,满足预期要求。



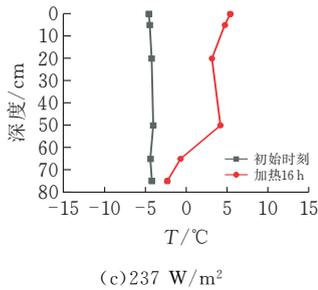


图8 纵向不同功率温度变化趋势

### 3 结论

1)在一定时间内,道面层温升效果最好,温度最高且升温最快。在实际工程中,在保证碳纤维发热线不被破坏的前提下,可将发热线尽可能埋置在离道面最近的位置,使得道面融雪化冰效果更好。

2)随着加热开始,试件整体温度均匀上升,中心温度上升效果最好,板边其次,板角最差。这表明,温度场中心温度向四周均匀传递,离温度场中心越远,传递效果越弱。

3)对于碳纤维发热线,不同的输入功率,决定试件整体的温升效果。试验表明:当恒温室内环境为 $-5^{\circ}\text{C}$ 时,发热功率为 $237\text{ W/m}^2$ ,加热 $2.5\text{ h}$ 试件升温最快稳定在 $0^{\circ}\text{C}$ 左右且最终稳定在 $6.6^{\circ}\text{C}$ 左右,能够保证试件道面上无冰雪堆积。故当环境温度 $-10^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ 时, $237\text{ W/m}^2$ 为三个发热功率中除冰的最小有效功率。

### [参考文献]

- [1] 高志斌,张长安,孙士博.某机场沥青混凝土路面融雪化冰技术研究[J].低温建筑技术,2017(11):28-32+37.
- [2] 王亚晨,张诗颖.对“路面除雪融冰”问题的探讨[J].城市建筑,2020,17(8):161-163.
- [3] 张炳臣,刘淑敏.冬季道路除雪方式的探讨[J].山东交通科技,2004(1):76-77.
- [4] 张旭.融雪剂的现状及对环境的影响和对策[J].环境卫生工程,2017,25(5):64-65+68.
- [5] 赵嵩颖,付言,王晨.地热能融雪技术研究[J].工业安全与环保,2018(1):96-98+102.
- [6] 符养斌,黄有波,李炎锋,等.碳纤维与电缆加热用于道路融雪对比分析[J].中国科技信息,2017(Z1):42-43+45.
- [7] 李荣清,王超,朱耀庭,等.碳纤维发热线桥面铺装融雪化冰试验研究[J].中外公路,2019,39(6):241-244.
- [8] 李春鸣,许巍,李强,等.连续式碳纤维自发热机场道面升温规律试验研究[J].玻璃钢复合材料,2015(11):64-70.
- [9] 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(3):217-222.
- [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.

## Research on Snow Melting Model Test of Carbon Fiber Heating Wire on Airport Pavement

XING Jiaming, XIAO Henglin, CHEN Zhi

(School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

**Abstract:** In order to analyze the feasibility of the carbon fiber heating wire to melt the ice and snow of the airport pavement, the temperature rise law of the airport pavement is studied by making large scale airport concrete model specimens in a constant temperature laboratory. The results show that increasing the heating power and reducing the spacing of the carbon fiber heating wires are conducive to efficiently melting the ice and snow on the pavement surface. The parameters of the carbon fiber heating wires under the road surface with a spacing of 100 mm and a heating power of  $237\text{ W/m}^2$  are preferred. The setting environment of the constant temperature indoor test is  $5^{\circ}\text{C}$ , the heating power is  $237\text{ W/m}^2$ , the spacing of the heating wires is 100mm, and the temperature rise of the test piece is stable at about  $0^{\circ}\text{C}$  and finally stable at about  $4^{\circ}\text{C}$  after heating for 4 h, which can guarantee the test No ice and snow accumulation on the road surface.

**Keywords:** carbon fiber heating wire; temperature field; temperature rise law; input power; heat insulation layer; melting snow and melting ice