

文章编号:1673-9469(2021)03-0069-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.03.010

# 空心陶瓷微珠隔热层对碳纤维电缆融雪路面 升温速率影响研究

赵亚军<sup>1,2</sup>, 刘 阳<sup>1</sup>, 赵锐军<sup>3</sup>, 彭月明<sup>4</sup>, 李彦苍<sup>1</sup>

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工程大学  
力学实验教学示范中心, 河北 邯郸 056038; 3. 张家口通泰高速公路投资股份有限公司,  
河北 张家口 075099; 4. 河北省建筑科学研究院, 河北 石家庄 050021)

**摘要:** 为分析空心陶瓷微珠隔热层对碳纤维电缆融雪路面升温速率的影响, 综合考虑公路路面、外部环境及碳纤维发热电缆的传热特性, 利用红外热成像技术与数值模拟, 分析了隔热层对融雪路面升温速率的影响, 揭示了空心陶瓷微珠的隔热机理。研究表明: 空心陶瓷微珠隔热层能够显著提高融雪路面的升温速率, 增设隔热层升温速率提高 23.4%~35.3%, 在电缆间距 200 mm、埋深 5 cm 的试验路段, 经过 2 h 升温试验, 路面最高温度从 -5.2 °C 达到 1.8 °C, 平均升温速率为 3.5 °C/h。空心陶瓷微珠组合形成的反热隔热层, 能很好地吸波反射、降低导热率, 减小热量向下传播, 使热量多集中在路面上层, 温度场分布更加均匀。增设空心陶瓷微珠隔热层较减小电缆间距可节约 88.3%~91.7% 的材料成本。

**关键词:** 道路工程; 碳纤维发热电缆; 数值模拟; 融雪模型; 保温隔热层

**中图分类号:** U416.217

**文献标识码:** A

## Effect of Hollow Ceramic Bead Insulation Layer on Heating Rate of Carbon Fiber Cable Snowmelt Pavement

ZHAO Yajun<sup>1,2</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, ZHAO Ruijun<sup>3</sup>, PENG Yueming<sup>4</sup>, LI Yancang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;  
2. Demonstration Center for Experimental Teaching of Mechanics, Hebei University of Engineering,  
Handan, Hebei 056038, China; 3. Zhangjiakou Tongtai Expressway Investment Co., Ltd., Zhangjiakou,  
Hebei 075099, China; 4. Hebei Academy of Building Science, Shijiazhuang, Hebei 050021, China)

**Abstract:** For analysis of hollow ceramic beads insulation effect on the carbon fiber cable snowmelt pavement heating rate, comprehensively considering road surface and the external environment and heat transfer characteristics of carbon fiber heating cable, using infrared thermal imaging technology and numerical simulation, the influence of the thermal insulation layer on the heating rate of the snow-melting pavement is analyzed, and the thermal insulation mechanism of the hollow ceramic microspheres is revealed. The results show that the heating rate of snowmelt road surface can be increased by 23.4%~35.3% by adding the insulation layer. In the test section with cable spacing of 200 mm and buried depth of 5 cm, after 2 hours of heating test, the highest temperature of road surface reaches 1.8 °C from -5.2 °C, and the average heating rate is 3.5 °C/h. The anti-heat insulation layer formed by the combination of hollow ceramic microbeads can absorb and reflect waves well, reduce the thermal conductivity, reduce the downward transmission of heat, so that the heat is mostly concentrated on the upper surface of the road, and the temperature field is more uniform. The material cost can be saved 88.3%~91.7% by adding hollow ceramic bead insulation layer to reduce the cable spacing.

收稿日期: 2021-05-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51908188)

作者简介: 赵亚军(1979-), 男, 河南汤阴人, 博士, 副教授, 从事新材料研究。

**Key words:** road works; carbon fiber heating cable road; numerical simulation; snowmelt model; insulation layer

冬季道路积雪结冰,严重影响道路交通安全。25%~30%的交通事故是由寒冷的冬季路面结冰造成的,干燥的沥青路面附着系数为0.6,路面有积雪时,附着系数为0.2,路面结冰时,附着系数为0.15,路面积雪、结冰时附着系数分别为干燥沥青路面的1/3和1/4<sup>[1]</sup>。目前,国内外融雪除冰方法主要有有人工清除、机械清除、化学融化、热融化四大类<sup>[2]</sup>。而近年来,热融化除冰方法凭借其环保特点,得到快速发展,这种方法主要分为3类:电加热法、流体加热法、地热管法<sup>[3-6]</sup>。其中碳纤维发热电缆属于电加热法中一种典型方法,其热转化率高,对道路结构受力影响小,环保、节能、易于施工、安全可靠<sup>[4]</sup>。众多学者对碳纤维电缆路面融雪的研究,主要集中于电缆埋深、间距、能耗与温度分布之间的关系<sup>[7]</sup>。陈绍辉等<sup>[8]</sup>对碳纤维电缆间距、埋深进行室内试验,通过数值模拟,对路面结构热物性参数进行分析。李荣清等<sup>[9]</sup>研究了间距、功率对融雪效果的影响。袁玉卿等<sup>[10]</sup>得出电缆布设形式、环境温度、积雪温度、通电时间与功率都会影响融雪效果。张楚杰等<sup>[11]</sup>利用数值模拟方法,研究了间距与埋深对路面温度均匀性影响。为提高升温速率和融雪效果,单纯地减小电缆间距、埋深或增大电缆功率并不能有效解决现实问题,减小电缆间距不利于节能,埋深太浅可能会造成路面结构的损伤,增加功率会使成本大幅增加。而

保温隔热材料在工程中普遍应用,且造价成本较低,增加保温层能够有效提高升温速率和融雪效果,对结构的保温节能起着重要作用。因此,研究保温隔热层对融雪路面升温速率的影响意义重大。

本文选用含有陶瓷微珠的隔热材料作为隔热层,结合碳纤维电缆传热原理与路面结构特点,进行升温试验与数值分析,研究空心陶瓷微珠隔热层对碳纤维电缆融雪效果的影响。同时在实际道路中进行性能测试,对路面融雪除冰设计提供理论与技术支持。

## 1 室内升温试验

### 1.1 试验准备

试验中所使用的碳纤维电缆直径为5.2 mm,输入功率为35 W/m,外包材料为聚四氟乙烯+聚氯乙烯+聚乙烯。隔热层由空心陶瓷微珠、无机硅酸盐溶液、硅酸铝纤维和热反射物质组成,可承受2 000 °C高温,具有隔热保温、防水阻燃、附着力强、施工方便、使用寿命长等特点。试件材料参数如表1。

共制作内置碳纤维电缆沥青混凝土试件6个,尺寸为300 mm×300 mm×100 mm。碳纤维发热电缆铺设在上下面层之间,埋设深度为50 mm,内置碳纤维电缆试件设计参数如表2所示,试件制作过程如图1所示。

表1 试件结构主要特性参数

Tab. 1 Main characteristic parameters of specimen structure

种类	项目	技术要求	试验结果
沥青	针入度(100 g, 5 s, 0.1 mm, 25 °C; 0.1 mm)	60~70	66.7
	延度(15 °C; cm)	>100	168.5
	软化点 TR&B/°C	>44	46.5
	密度(15 °C; g/cm <sup>3</sup> )	实测记录	1.018
	质量损失/%	≤±0.8	0.38
	TFOT后15 °C延度/mm	20	>30
	TFOT后10 °C延度/mm	8	25.4
集料	粒径/mm	实测记录	0.6~13.2
	表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	实测记录	2.64~2.82
	级配0.6 mm筛余率/%	100	100
矿粉	级配0.15 mm筛余率/%	90~100	94.5
	级配0.075 mm筛余率/%	75~100	80.2
	表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	>2.50	2.741
保温隔热漆	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	实测记录	2.0
	导热系数/(·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	实测记录	0.03

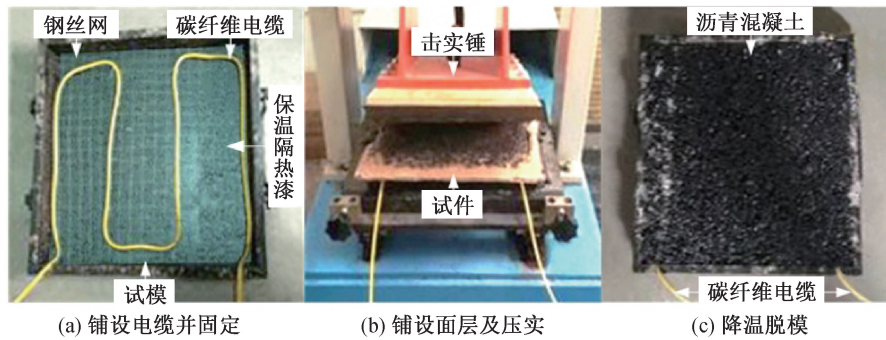


图 1 内置碳纤维发热电缆试件制作过程

Fig. 1 The fabrication process of the embedded carbon fiber heating cable specimen

表 2 内置碳纤维发热电缆试件设计参数  
Tab. 2 Design parameters of carbon fiber heating cable specimen

试件编号	电缆间距/mm	保温隔热漆厚度/(kg·m <sup>-2</sup> )
T1	未布设	—
T2	50	—
T3	100	—
T4	100	2.22
T5	100	4.44
T6	100	6.66

1.2 试验结果分析

为统一初始温度,将待试验试件放入低温恒定试验箱内进行降温,降为设定温度-20℃后,开始在试验箱内进行升温试验,经过6h升温试验,得到各试件的升温曲线,如图2所示。

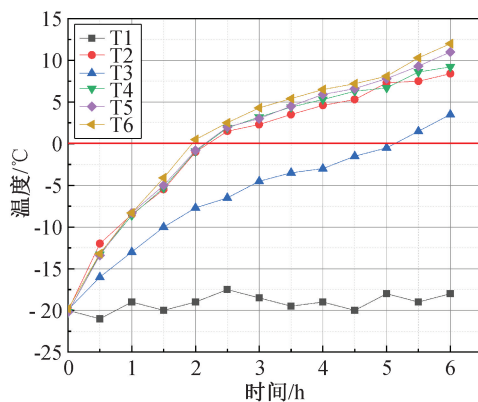


图 2 升温试验曲线图

Fig. 2 Temperature curve of specimen

在升温试验中,升温速率从升温曲线中表现为0℃之前增长较快,0℃之后逐渐趋于平缓,整体表现为非线性增长的趋势。在6h时,T2、T3表面温度增幅分别为28.4℃、23.4℃,T2较T3升温速率提高了0.83℃/h,先于T3到达0℃近3h。由此可以得出,试件的升温速率、最终表面温

度与电缆布置间距有一定关系,间距越小,升温速率、最终表面温度增幅越大。

在同间距条件下,增设隔热层的试件,均在2h左右达到0℃。T4、T5、T6最终表面平均温度分别为9.2℃、11℃、12℃,比T3温度分别高出5.7℃、7.5℃、8.5℃,整体升温速率平均提高0.95~1.42℃/h。由图2可以看出,T2的升温曲线与T4、T5、T6较为接近,虽在1h内T2的升温速率较高,但随着时间的推移,在2.5h左右,后三者的温度均要高于T2,且最终温度也均要高于T2。可以看出,增设隔热层要优于减小电缆间距,但由于设置2.22kg/m<sup>2</sup>隔热层时,隔热效果已经接近最佳,T4、T5、T6之间的最终表面温度相差较小。

在本试验中,增设隔热层试件整体表现为良好的保温隔热性能,能够同减小50%间距情况,达到基本一致的升温效果。与此同时,空心陶瓷微珠隔热层的材料成本价格在1.2元/m<sup>2</sup>左右,电缆铺设间距为100mm的成本价格为120元/m<sup>2</sup>。若为提高升温速率,缩短电缆间距,则会导致成本翻倍,而使用空心微珠隔热层,每平方米成本仅增加1~1.4元便可达到同等效果,增设隔热层较减小电缆间距节约成本约88.3%~91.7%。

2 试验路段升温试验

为分析升温性能,铺设试验路段,碳纤维加热电缆铺设埋深为30mm,铺设间距200mm。图3为施工过程,在下面层施工结束后,首先对路面除灰清理,确保各层有效粘结,之后滚涂隔热层3遍。将固定于钢丝网上的碳纤维电缆铺设固定后,喷洒乳化沥青,以增强上下面层的粘结。为避免摊铺机履带压断电缆,首先人工铺洒少量沥青混合料,以刚好埋住电缆为宜,来分担履带压力,然后正常摊铺碾压。



图3 试验路段施工工序

Fig. 3 Construction process of test section

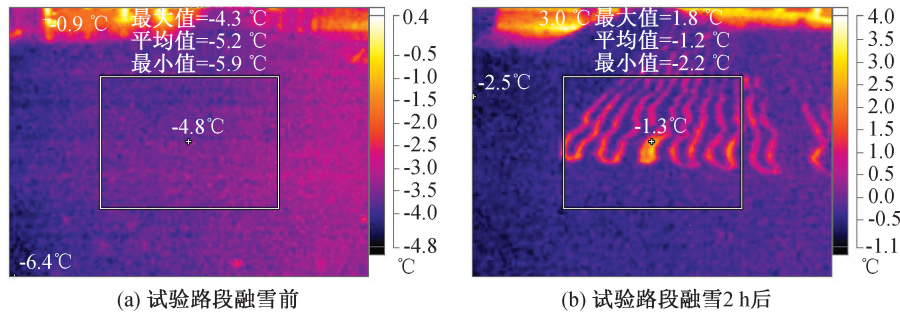


图4 试验路段融雪效果

Fig. 4 Snowmelt effect of test section

图4为融雪前后的红外热成像图,路面平均温度为 $-5.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,电缆工作2h后,铺设电缆位置温度达到 $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,积雪全部融化,融雪效果显著,验证了增设空心陶瓷微珠隔热层的碳纤维电缆融雪路面的有效性。

### 3 隔热层隔热机理分析

空心陶瓷微珠能很好地降低涂料的导热系数,反射和隔绝了热量的传递,决定了隔热层良好的保温绝热性能,图5为空心陶瓷微珠隔热层隔热机理示意图。在升温试验中,由空心陶瓷微珠及其他物质组成的保温隔热层,会形成一个热量反射层,电缆通电时,阻隔大量的热量向基层传播,只有少部分热量会穿透或流失。在试验初期时,由于电缆温度较低,升温速率较无保温层的提升不明显,在电缆达到额定工作温度后,中心温度趋于恒定,升温速率较无保温层的有明显提升。

微珠球内外壁面的辐射反射率很高,可以起到对红外热辐射进行吸收、散射的作用。同时由于空心结构的存在,使得部分热辐射波进入空心陶瓷微珠内部后,在球体内部反复折射、干涉,特殊情况下产生谐振损耗<sup>[12]</sup>。当一均匀的平面纵波或横波遇到单个球形空心陶瓷微珠后,首先经过较薄的球壁折射并损耗一小部分入射波,再从球壁折射出在空心内部多次折射与反射,相互之间干涉抵消,此外,球壁中具有的吸波相组成也会吸收部分热辐射波<sup>[13]</sup>。

通过涂层反射层对热辐射的反射作用,及静止空气层对辐射和对流传热的有效抑制,使绝大部分的辐射热能被反射阻隔,有效提升高温条件下涂层的总热阻<sup>[14]</sup>,从而增大隔热层两表面的温度差和传热热阻,降低导热系数,有效抑制热传导和热辐射向下层传播,提高路面的升温速率。

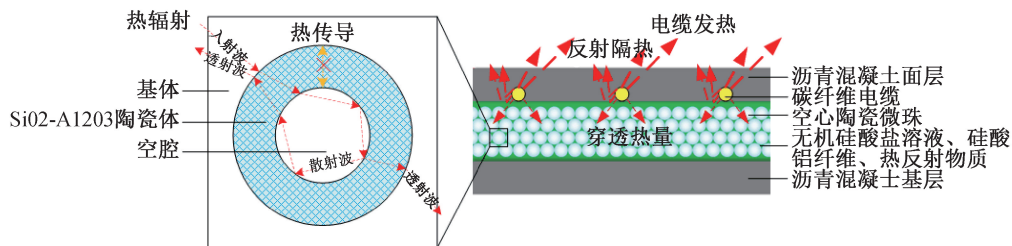


图5 空心陶瓷微珠隔热层隔热机理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of insulation mechanism of hollow ceramic microsphere insulation layer

## 4 热通量与温度场数值分析

### 4.1 模型建立

为分析对比隔热层对热流传递过程的影响,采用试验路段实际结构参数,如表 3 所示,同时结合试验路段结构分层<sup>[15]</sup>,如图 6 所示,利用 ABAQUS 数值模拟软件,建立碳纤维融雪路面数值模型,如图 7 所示。选用八节点传热六面体单元 DC3D8 为路面单元类型,设置瞬态热传递分析步,将热传导边界条件、对流换热、辐射等设置为加载条件,在预定义场中设定路面整体初始温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,通过设定膜层散热系数来定义表面热交换条件,其中路表面为 $23.2\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ ,电缆为 $60\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ ,保温层为 $18\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ ,模拟试验环境为降雪环境,环境温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,风速为 $3\text{ m/s}$ ,铺装功率为 $300\text{ W}/\text{m}^2$ 。

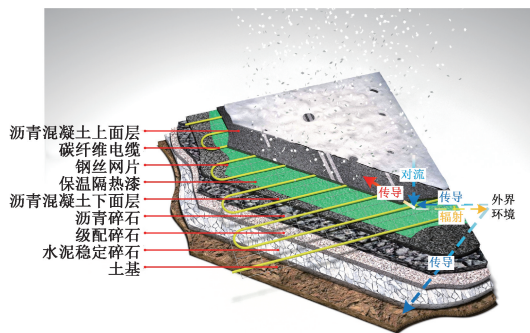


图 6 试验路段结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of test section structure

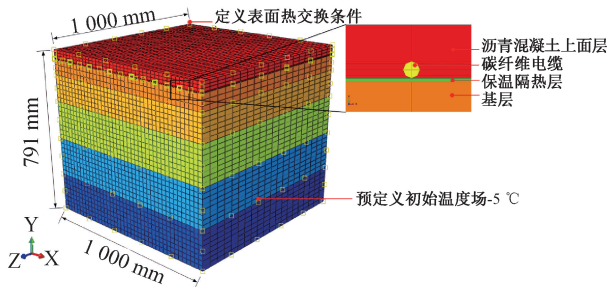


图 7 有限元模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of finite element model

### 4.2 热通量分析

通过数值计算,得到了增设保温层和无保温层的动态升温过程,热通量的变化反应了热传递的方向与大小,如图 8 所示。

无保温层试件的热量主要集中在电缆层和结构下部,且热流密度不均匀,热流向下传递趋势大,热量损失较多,路面升温效果不理想。有保温层试件的热传导方向主要集中在结构上部,热量损失较少,且温度分布较为均匀,表面温度高于无保温层试件。

### 4.3 温度场分析

数值模拟结果如图 9 所示,无保温隔热层的融雪路面温度场,平均表面温度仅为 $-2.48\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,试验路段的融雪路面温度场,如图 9(b)所示,表面温度 $2.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。两者在仿真结果中相差 $4.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,与试验结果基本吻合。

从分析结果的温度分布云图中可以看出,试验路段表面温度分布十分均匀,有利于对路面整体温度的控制,且隔热层在电缆工作过程中的阻热和反热的效果十分明显,向结构基层热流损失较未涂隔热层结构的少 $0.71\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。

## 5 结论

本文提出了一种高效经济的路面隔热层,可用于公路或桥梁路面融雪,通过室内试验、数值模拟及试验路段验证,分析了保温层对路面温度场的影响,结果表明:

1) 增设隔热层对提高最终表面温度有显著效果,较无隔热层设置的试件最终表面温度高出 $23.4\% \sim 35.3\%$ ,升温速率提升 $0.95 \sim 1.42\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。隔热层增设厚度每增加一倍升温速率提升 $3\% \sim 6\%$ ,故选用隔热层厚度不宜过大。

2) 空心微珠的低导热率、吸波反射作用是影响升温速率的主要原因。在碳纤维电缆下方增设

表 3 试验路段结构特性参数

Tab. 3 Test section structural characteristic parameters

各层材料类型	厚度/m	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	比热容/ $[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}]$	导热系数/ $[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}]$
沥青混凝土上面层	0.05	2 100	1 163	2.05
碳纤维电缆	—	2 000	800	19.2
保温隔热层	0.001	2 000	836	0.03
沥青混凝土下面层	0.08	2 400	894	1.25
沥青碎石	0.14	2 600	920	1.163
级配碎石	0.2	1 800	921.1	1.396
水泥稳定碎石	0.2	2 077	810	1.1
土基	0.2	1 700	860	1.3

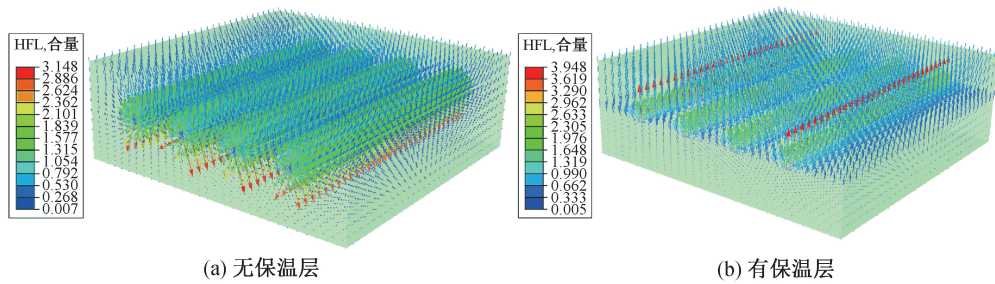


图8 热通量矢量云图

Fig. 8 Heat flux vector nephogram

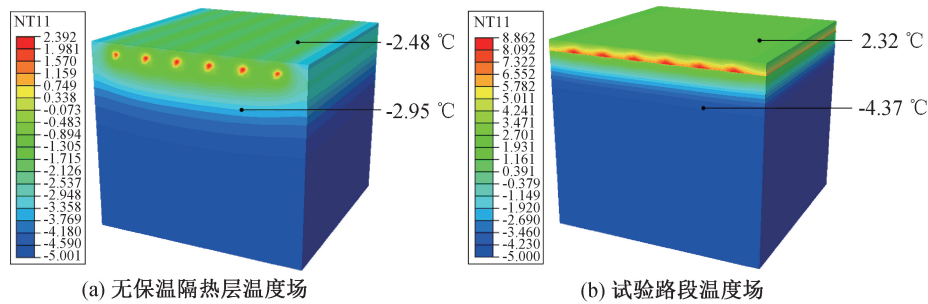


图9 数值模拟结果

Fig. 9 Numerical simulation results

隔热层,可以有效防止热量向下部流失,使热流密度集中在路面的上层,更有利于冰雪快速有效地融化。

3)在融雪路面中增设空心微珠隔热层可以节省大量安装与运行成本。使用空心微珠保温隔热层较减小电缆间距,在同升温速率下,节约电缆材料成本 88.3%~91.7%与 50%耗电量;在同耗电量下,升温速率提高 30%左右。

#### 参考文献:

- [1] 孙宝锋. 橡胶颗粒除冰雪沥青混合料设计与施工工艺研究[D]. 西安:长安大学,2011.
- [2] 余进华,李婕,袁铜森,等. 路面积雪结冰清除技术综述[J]. 湖南交通科技,2016,42(01):51-55.
- [3] 党政,关文,程晓辉,等. CFG 能源桩用于混凝土路面除冰降温的试验研究[J]. 中国公路学报,2019,32(02):19-30.
- [4] MOHAMMED A G, OZGUR G, SEVKAT E. Electrical Resistance Heating for Deicing and Snow Melting Applications: Experimental Study[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 160: 128-138.
- [5] 徐慧宁,谭忆秋,SPITLER J D,等. 流体加热道路融雪系统温-湿耦合融雪模型[J]. 中国公路学报,2013,26(05):42-53.
- [6] HO I, DICKSON M. Numerical Modeling of Heat Production Using Geothermal Energy for a Snow-melting System [J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2017, 10: 42-51.
- [7] 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(02):29-33.
- [8] 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(02):34-40.
- [9] 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(06):241-244.
- [10] 袁玉卿,张业,郭斌. 预埋碳纤维发热线沥青混凝土融雪试验研究[J]. 中国科技论文,2019,14(06):637-641.
- [11] 张楚杰,许巍,蔡良才,等. 连续式碳纤维电热机场道面融雪化冰数值模拟与验证[J]. 硅酸盐通报,2018,37(01):369-375.
- [12] 吴正华. 陶瓷微球填充型热障涂层的隔热分析与优化[D]. 大连:大连理工大学,2009.
- [13] 邵景玲,王建江,宋代敏,等. 热喷涂技术制备空心陶瓷微珠吸波剂的结构与性能研究[J]. 铸造技术,2012,33(11):1261-1264.
- [14] 洪晓,朱长林. 耐高温隔热保温涂料的研制[J]. 石化技术,2008(01):1-3+7.
- [15] 赵云辰,赵振国. 寒区级配碎石上基层厚度和模量对沥青路面结构力学影响研究[J]. 路基工程,2020(03):55-60.

(责任编辑 王利君)