

除雪化冰路面微波敏感涂层材料与设备

王剑英^{1,2},王选仓¹,丁龙亭¹,付林杰¹

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 黑龙江工程学院 土木与建筑工程学院,黑龙江 哈尔滨 150050)

摘 要:为了在寒冷地区进行科学有效、环保经济的道路除雪化冰,弥补现有传统除雪化冰方法存在的缺陷,提出微波除雪化冰涂层技术。基于微波吸收材料的吸波机理与影响因素,优选羟基铁粉(RW)、羟基铁粉(YW1)、四氧化三铁、氧化铝和膨胀石墨作为微波敏感涂层吸波材料,进行微波敏感涂层材料融冰试验;通过对比不同组试验的温度升高值,分析不同涂层材料吸收微波产热并融化厚冰的能力,选用四氧化三铁、RW、膨胀石墨作为涂层材料分别进行涂层试件加热与融冰试验,研究沥青混凝土吸波涂层路面实际吸收微波融雪化冰的能力,在沥青混凝土试件制作涂层后,冻制 5 cm 的厚冰,微波加热下采用升温差值来直观比较涂层材料吸收微波升温能力,综合考虑微波除冰效率、经济成本等因素,提出选用膨胀石墨作为微波敏感涂层材料。此外,进行了除雪化冰微波设备发射频率、功率、磁控管阵列等技术参数研究,在此基础上研发了便携式微波除冰车,并进行了便携式微波除冰车现场涂层微波加热试验。研究结果表明:四氧化三铁、RW、膨胀石墨 3 种材料吸收微波升温融冰的效果较好,膨胀石墨 60 s 升温差值为 40.2 °C,四氧化三铁为 8.4 °C;采用膨胀石墨作为涂层材料与便携式微波除冰车配合应用的除冰效果良好,今后可为大型微波除冰雪设备的研究开发提供依据。

关键词:道路工程;微波加热;除雪化冰;吸波机理;涂层;便携式微波除冰车

中图分类号:U414.1 **文献标志码:**A

Microwave sensitive coating materials and equipment for snow removal

WANG Jian-ying^{1,2}, WANG Xuan-cang¹, DING Long-ting¹, FU Lin-jie¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. College of Civil Architectural Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to effectively snow removal in cold regions in an environmentally and economically friendly manner, and to overcome the shortcomings of existing traditional methods of snow removal, a microwave deicing coating technology was proposed. On the basis of the absorption mechanism and influencing factors of the microwave absorbing material, hydroxy iron powder (RW), hydroxy iron powder (YW1), ferroferric oxide, alumina, and expanded graphite were preferred as the microwave sensitive coating absorbing materials. The microwave sensitive coating materials were tested by melting ice. By comparing the temperature rise from different sets of tests, the ability of different coating materials to absorb microwave heat and melt thick ice was analyzed. Ferroferric oxide, RW, and expanded graphite were used as coating materials in coated specimen heating tests and ice melting tests, respectively, and the ability of coated asphalt

concrete pavement to absorb microwaves and melt ice was studied. After the coated asphalt concrete specimens were prepared, a layer of 5-cm-thick ice was frozen, and the difference in temperature rise was used to directly compare their ability to absorb microwaves. Considering factors such as microwave deicing efficiency and cost, expanded graphite was proposed to use as the microwave sensitive coating material. In addition, the technical parameters of frequency, power, and magnetron array of the deicing microwave equipment were studied. A portable microwave deicing vehicle was developed based on this, and a microwave heating test using a portable microwave deicer was conducted on site. The results show that ferroferric oxide, RW, and expanded graphite have better ability of absorbing microwaves and melting ice. The temperature increases by 40.2 °C for expanded graphite in 60 s, whereas it increases by 8.4 °C for the ferroferric oxide. The use of expanded graphite as a coating material, combination with a portable microwave deicing vehicle has a good deicing effect. It can provide a basis for the development of large-scale microwave deicing equipment. 3 tabs, 10 figs, 28 refs.

Key words: road engineering; microwave heating; snow removal; absorption mechanism; coating; portable microwave deicing vehicle

0 引言

道路的积雪结冰问题在全世界都是一个非常普遍并亟待解决的问题,不仅在北美、北欧以及俄罗斯比较严重,在中国北方尤其是东北地区也非常严重。目前,各国普遍采用机械除雪或撒布融雪剂进行道路的融雪化冰^[1-2]。传统机械除雪效率高,但大多仅适用于未经碾压的新雪,对于已冰冻路段的清除效果并不理想,同时强制铲除对路面损害严重,造成道路养护费用的额外支出^[3-4];融雪剂大多效率低,费用高,且污染环境,对路面及桥面结构腐蚀严重^[5-8]。因此,综合考虑寒冷地区冰雪对道路交通的危害以及现有融雪化冰方法存在的缺陷,如何进行科学有效、环保经济的道路(尤其是高寒地区)融雪化冰已成为急需解决的问题。

针对传统除冰雪方法的不足,在融雪化冰技术方面,研究人员着重于抑制冻结铺装类^[9-11]、热力加热^[12]、能量转化^[13]、微波除冰雪等新技术。利用微波除冰雪的新型热力融雪化冰方法因具有不损伤路面、不污染环境、厚冰清除能效高等优点而得到广大学者的青睐。微波除雪化冰技术主要是利用微波穿透冰层加热路面,路面升温后使得冰层与路面之间界面分离,达到除冰目的^[14-16]。此技术与已有的传统机械除冰雪技术相结合成为除冰雪技术新的研究创新方向。

美国明尼苏达大学的 Hopstock 等建立了微波除冰模型并研制出了微波除冰车^[17]。Hopstock 等还提出将铁隧岩掺加到道路建筑材料中,可有效提

高道路材料对微波能量的吸收能力,减少微波能损失,进而利用微波技术快速有效清除路面结冰,美国自然研究所(NRRI)根据此成果发现了一种能较大程度吸收微波能量的材料,并利用该材料铺设微波路,缩短了微波除冰时间^[18-19]。中国首先利用微波加热原理进行除冰研究,徐宇工等通过室内微波透射冰层试验,研究了不同材质、不同含水量等情况下微波能量的吸收率及微波渗透深度,设计了微波除冰车模型^[20-21]。焦生杰等与美的集团联合实验室和博士后流动站共同进行了微波除冰雪技术的相关研究^[22-23]。陆松等运用 COMSOL Multiphysics 建立了微波除冰仿真模型,分析了微波频率和路面材料特性对机场路面微波除冰效率的影响^[24]。Liu 等提出了利用电热管融化冰雪路面方法(ISMP)和带有电加热管的自动融雪系统(AS-EHP)^[25-26]。Liu 等还针对沥青路面利用加热电缆(AMCS)融雪时可能产生的层间稳定问题,提出了改进的库伦定理模型来预测 AMCS 的抗剪强度^[27]。

综上,目前将微波加热技术推广到道路除雪化冰,还处于起步阶段,尚有很多问题需要解决。为此,本文基于微波吸收材料的吸波机理和影响因素,选取微波材料进行加热融冰试验,并研发便携式微波除冰车,为微波除冰雪技术的推广应用提供理论指导和实践依据。

1 微波吸收材料的吸波机理

根据微波加热理论与实践可知,微波加热实际是消耗功率的过程,而加热单位体积的物质需要消

耗的微波功率 P 的计算为

$$P=0.556f\epsilon_r'\tan(\delta)E^2\times10^{-12}\tag{1}$$

式中: f 为微波工作频率; ϵ_r' 为相对介电常数; δ 为介质损耗角; E 为微波电场强度的有效值^[28]。

从式(1)可以看出,影响物质吸收微波能量的主要性能参数是相对介电常数和介质损耗角正切,其值越小,物质的吸波能力越差。表 1 为不同物质的相对介电常数和介质损耗角正切。

表 1 物质的相对介电常数和介质损耗角正切

Tab. 1 ϵ_r' and $\tan(\delta)$ of materials

介质	相对介电常数	介质损耗角正切
水	76.7	0.157 0
冰	3.2	0.000 9
沥青混凝土	4.5~6.5	0.015 0~0.036 0

由表 1 可知,冰的相对介电常数仅为 3.2,介质损耗角正切值为 0.000 9,均较小。由式(1)可知,当 $\tan(\delta)=0.000\ 9$ 时,微波在冰中的损耗功率极小。因此在应用微波加热道路路面的结冰时,微波能量在冰层中损耗的极小,即路面的冰层几乎不吸收微波能量。微波能量可以直接穿透冰层,如同光线可以穿过透明的玻璃一样。微波穿透冰层后直接作用在道路面层上,面层材料如沥青混凝土和水泥混凝土,可以吸收一部分的微波能,并将微波能转化为热能,进而融化道路面层与冰层结合处的结冰。当结合处的冰融化成水后,由于液态水也可以大量吸收微波能,这会大大加速道路面层与冰层结合处结冰融化,进而降低了冰面层结合处的黏结应力;当黏结力为 0 时,道路除冰更简单,只需要加入机械或者人力就可以轻松的将结冰移除路面,实现道路的融冰。除雪化冰简化模型如图 1 所示。

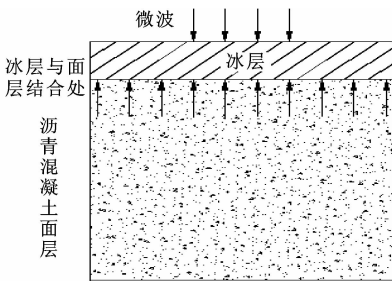


图 1 除雪化冰简化模型

Fig. 1 Simplified model for removing snow and ice

2 除雪化冰路面微波敏感涂层材料研发

2.1 微波敏感涂层材料的选择

吸波材料是一种使入射电磁波最大限度地进入

到材料内部,并能有效吸收衰减入射电磁波,将其转化成热能等其他形式能量而损耗掉或使电磁波消失的一种功能材料,微波吸收材料的吸波性能受介电损耗和磁损耗的影响。

介电损耗的影响:介电损耗是指电介质在外电场作用下,将一部分电能转化成热能的物理过程,对于电损耗型的吸波材料,磁导率的实部 $\epsilon' = 1$,虚部 $\epsilon'' = 0$ 。影响单层吸波材料性能的只有介电常数和厚度两方面因素。在材料厚度和介电常数的虚部不变时,随着实部 ϵ' 的增大,吸收峰向高频方向移动。在材料厚度和实部 ϵ' 不变时,吸收峰所在频率随 ϵ'' 的变化不大,但是吸收峰的峰值变化较大,且与 ϵ' 有关。只有当 ϵ' 和 ϵ'' 取某一合适值时,才能获得最大的吸收峰值。

磁损耗的影响:磁损耗吸波涂层在交变磁场的作用下,其磁导率为复数,由于复数磁导率虚部的存在,使得磁感应强度落后于外加磁场,引起铁磁物质在交变磁化过程中不断的消耗能量。

基于吸波材料吸波机理和吸波性能影响因素的研究,本文选择属于磁性超细微粉的 2 种羟基铁粉和四氧化三铁,以及氧化铝、膨胀石墨作为吸波材料进行试验。

2.2 微波敏感涂层材料融冰试验

2.2.1 试验方案

试验选用的微波波导频率为 2.45 GHz,功率 800 W,波导口距离为 60 mm。微波涂层材料融冰试验选用水泥面板作载体进行材料涂层。试验前将 5 cm 厚冰置于不同涂层面上,然后利用微波分别加热 1、2 min,最后立即用红外线测温仪读取厚冰融化后的水温及接触面的冰块温度。通过对比不同组试验的温度升高值,分析不同涂层材料吸收微波产热并融化厚冰的能力。

选用硅酸钠溶液作为涂层黏结溶剂,其物理指标如表 2 所示。当硅酸钠溶液中的水分蒸发后,硅酸钠并不吸收微波产热,因此不会对试验结果造成任何干扰。

表 2 硅酸钠溶液物理指标

Tab. 2 Physical indicators of sodium silicate solution

参数	模数	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	黏度 η/s	表面张力 $\sigma/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	凝胶化值 k/cm^3	干拉强度 τ/MPa
参数值	2.85	1.43	9.6	96.1	1.81	0.954

称量四氧化三铁、氧化铝、优选羟基铁粉(RW)、羟基铁粉(YW1)、膨胀石墨各 2.5 g,分别置入有 60 ml 硅酸钠溶液的 5 个烧杯中,用玻璃棒搅

拌均匀。在水泥空地分画 5 块面积为 20 cm×20 cm 区域,并编号 1~5,将相对应编号的悬浮液分别取 30 ml 涂抹在画线的区域,晾干。如图 2 所示。

试验前,按要求调试并安装微波设备,利用电冰箱冻制 5 cm 厚冰,冰块温度-20 ℃,利用红外线测

温仪测量试验环境地面温度为 15.1 ℃。试验时,将 5 cm 厚冰迅速置于涂层上,启动微波波导加热,利用红外测温仪测量加热时间分别为 1、2 min 时的融化水温 and 接触面冰块温度。依次进行各组试验,并记录相关数据,如表 3 所示。

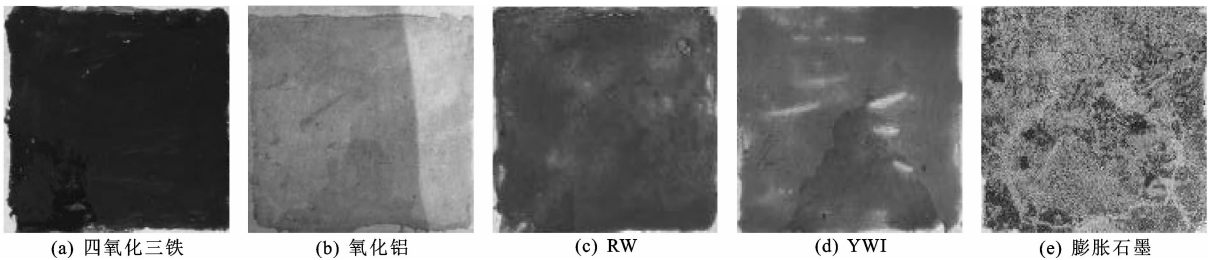


图 2 试验材料涂层

Fig. 2 Coating of test materials

表 3 微波加热后水温 and 接触面冰温

Tab. 3 Water temperatures and contact surface ice temperatures after microwave heating

材料	加热时间/ min	四氧化 三铁/℃	RW/ ℃	YW1/ ℃	膨胀 石墨/℃	氧化铝	对照组
地表水	2	32.5	31.0	26.0	45.8	无融化 迹象	无融化 迹象
冰块	2	2.5	2.2	1.7	3.3		
地表水	1	27.8	21.2	17.7	33.6		
冰块	1	1.8	1.2	1.1	2.5		

2.2.2 试验结论

从试验结果可以看出:微波加热下氧化铝涂层融冰效果较差,其和无涂层对照组均无融化迹象,说明氧化铝涂层材料吸波能力较弱;其他几种涂层材料在微波加热下冰层均发生融化,且地表水温升高明显,从水温升高情况可以得出不同涂层材料吸收微波并升温的能力从大到小依次为膨胀石墨、四氧化三铁、RW、YW1、氧化铝。影响物质吸收微波能量的主要性能参数是相对介电常数和介质损耗角正切,石墨、四氧化三铁的相对介电常数分别为 84、20,RW 与 YW1 的主要成分为 Fe,相对介电常数和介质损耗角正切均较大,所以微波下吸收能量多;而氧化铝的相对介电常数仅为 6.5,与水泥混凝土的相对介电常数 8 相差不大,故其吸收热量与无涂层时变化不大。基于以上分析,选择四氧化三铁、RW、膨胀石墨 3 种材料进行微波敏感材料涂层试件加热试验与融冰试验。

3 除雪化冰路面微波敏感材料涂层试验

3.1 微波敏感材料涂层试件加热试验

3.1.1 试验方案

为研究沥青混凝土吸波涂层路面实际吸收微波

并升温的能力,选用四氧化三铁、RW、膨胀石墨作为涂层材料,分别在沥青混凝土试件制作涂层,进行涂层试件微波加热试验。

试验前需要在沥青混凝土试件表面埋设热电偶,同时在微波暗室中进行操作。通过读取热电偶的升温数据,观察并记录试件表面微波加热时温度随时间的变化值,最终分析不同涂层试件吸收微波并产热的能力。

取出沥青混凝土试件,进行编号;配置涂层材料悬浮液,用玻璃棒搅拌均匀后,用毛刷均匀涂在试件表面,将试件置于通风处晾干。

待涂层彻底晾干后,用硅胶将热电偶的金属部分紧密粘贴在涂层试件的表面。用铝箔胶带将热电偶的导线严密包裹,防止微波辐射破坏导线,如图 3 所示。

试验时,将涂层试件置于波导下方的特制方盒内,拿出电偶显示屏,通过控制系统调整微波加热时间,启动微波设备,根据热电偶显示的数据记录时间和温度。

3.1.2 试验结果

图 4 为涂层材料微波加热试验结果。考虑到不同涂层试件表面的初始温度有差异,最终用升温差值来直观比较 3 种涂层材料的吸收微波升温的能力,结果见图 5。从图 5 可以看出,相同的时间内,膨胀石墨的温度升高值明显高于四氧化三铁和 RW,说明石墨微波下更容易吸收热量使温度升高,与上文中石墨相对介电常数和损耗角正切值大,吸收热量高的分析结论一致;相同时间内,四氧化三铁与 RW 涂层温度升高值差别不大,四氧化三铁吸收微波的能力略高于 RW。

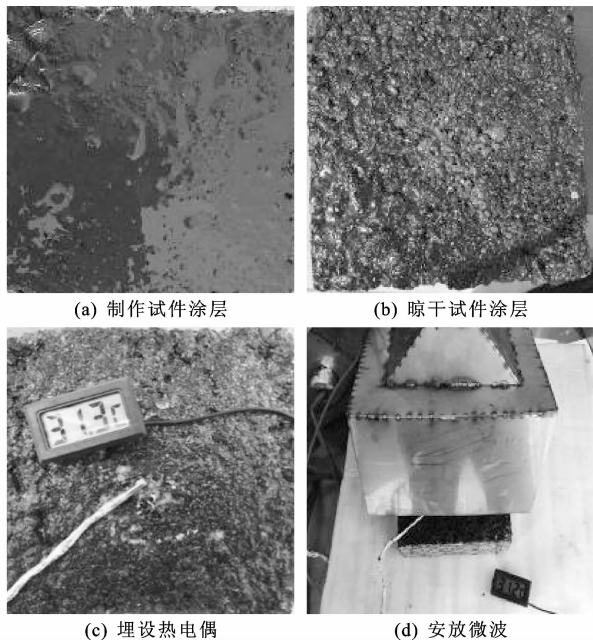


图 3 试件加热试验过程

Fig. 3 Specimens heating test process

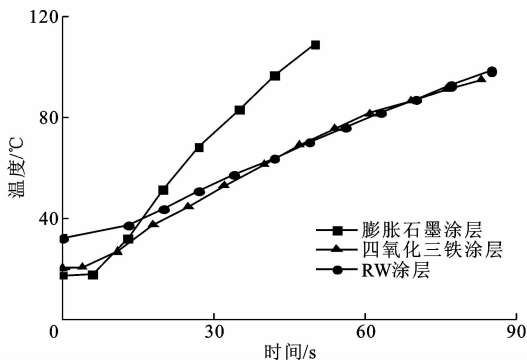


图 4 涂层材料微波加热试验结果

Fig. 4 Microwave heating test results of coating materials

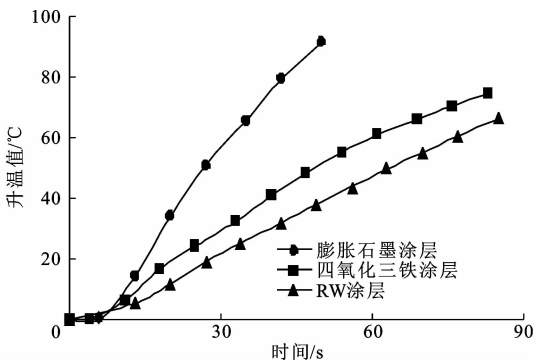


图 5 各涂层材料微波加热升温值对比

Fig. 5 Comparisons of temperature rise of microwave heating of coating materials

3.2 微波敏感材料涂层试件融冰试验

3.2.1 试验方案

为研究沥青混凝土吸波涂层路面的实际吸收微

波融雪化冰的能力,试验选用四氧化三铁、膨胀石墨作为涂层材料,分别在沥青混凝土试件制作涂层后,冻制 5 cm 的厚冰,然后进行涂层试件微波加热试验。试验微波条件同上。

试验前需要在沥青混凝土试件表面埋设热电偶,同时在微波暗室中进行操作。通过读取热电偶的升温数据,观察并记录试件表面微波加热时温度随时间的变化值,最终分析不同涂层试件吸收微波并产热融冰的能力。

试验前,需要在带有不同涂层的试件表面制冻 5 cm 厚的冰层,用硅胶将热电偶的金属部分紧密粘贴在涂层试件表面,用铝箔胶带将铠装热电偶的导线严密包裹,在塑料袋中加水至 5 cm 放置在冰柜中冷冻。在热电偶显示温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,将纸盒拿出,将带冰层的试件和纸盒、塑料袋快速剥离。

试验时,将带冰的涂层试件置于波导下方的特制方盒内,拿出电偶显示屏,控制系统调整微波加热时间,然后启动微波设备,根据铠装热电偶的显示屏数据同步记录时间和温度。

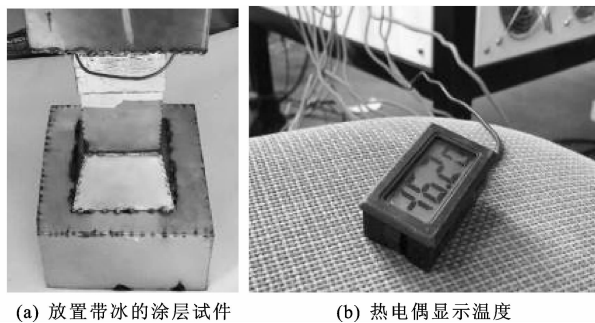


图 6 融冰试验过程

Fig. 6 Test process of ice melting

3.2.2 试验结果

采用升温差值来直观比较 2 种涂层材料的吸收微波升温的能力,结果见图 7。

从图 7 可以看出,相同时间内,膨胀石墨的吸收热量使温度提升值明显高于四氧化三铁,膨胀石墨涂层吸收微波热量的融冰能力较好,吸收微波 20 s 即可造成厚冰内部融化,效果显著。综合考虑微波除冰效率、经济成本等因素,可选用膨胀石墨作为微波敏感涂层材料进行微波除冰。

4 道路微波除雪化冰技术参数与设备

将微波除冰技术和机械方法相结合,发挥各自优势,其适应的除冰雪状态及深度范围更广。车载微波除冰既避免了传统机械除冰对道路的损坏,又提高了除冰雪效率,并且可以防止由于普通机械除

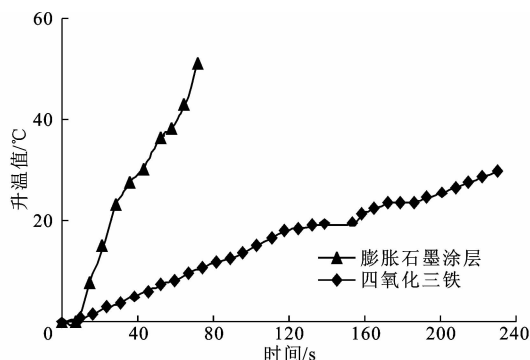


图7 四氧化三铁和膨胀石墨涂层融冰试验对比

Fig. 7 Comparisons of ice melting tests for ferric oxide and expanded graphite coatings

冰雪带来的二次结冰问题,以及避免融雪剂对环境及道路构筑物等的影响。

4.1 便携式微波除冰车技术参数优化

(1)微波发射频率

2.45 GHz 磁控管广泛应用于微波炉等家电或工业微波设备中,价格便宜,而 5.8 GHz 磁控管波长短,辐射深度低,价格为 2.45 GHz 磁控管的 100 倍以上,成本过高。微波除冰车需要多个磁控管组成阵列,因此,本文微波除冰雪车选用 2.45 GHz 磁控管。

(2)微波发射功率

根据相关试验,微波功率由 400 W 提高到 640 W,功率可提高 40%,试件表面温升提高较大;微波功率由 640 W 提高到 800 W,功率可提高 25%,试件表面温升提高相对有限。但微波发射功率不能过低,建议微波除冰雪设备的磁控管采用 640 和 800 W 两种可调功率,从而使得设备功能多样化。

(3)波导口距离

频率为 2.45 GHz 的微波,其波长较长,穿透能力强,波导口距离 30 mm 时,试件表面温度升高值与 10、20 mm 时相近,但波导口距离 90、40 mm 时,试件吸收的微波能极少。若冰厚小于 30 mm,建议调整波导口距离为 30 mm;若冰厚大于 30 mm,则应避免产生波导口距离 90、40 mm 的情况。

(4)磁控管阵列

2.45 GHz 的磁控管的波导口尺寸为 86 mm×53 mm,每个磁控管产生的微波辐射面积有限,为提高微波除冰雪效率,需要专门设计磁控管阵列的数目及形状。

4.2 便携式微波除冰车研发

为适应现场微波除冰试验,设计并制作一套便

携式微波除冰设备。设计参数如下:

(1)外形,试件长、宽、高分别为 60、40、46 cm;

(2)磁控管型号,松下磁控管 2M210-M1,灯丝电压 3.2 V,灯丝电流 10 A,阳极电压 4 200 V,阳极电流 300 mA,功率 900 W,频率 2 450 MHz,喇叭形波导口边长 130 mm,间距 150 mm;

(3)变压器,输入电压 220 V,输出电压 2 100 V,50 Hz;

(4)风扇,散热排风扇 2 个;

(5)导线,10 m 长导线;

(6)滚轮,轮径 4 cm,万向轮 2 个,定向轮 2 个。

考虑到微波简易除冰车在使用过程中造成的微波泄漏问题,本文设计了采用全金属外壳,净空低至 2 cm,下部围设吸水海绵。金属外壳能有效防止微波穿透,吸水海绵则用于吸收残余微波,减少微波外泄。

设备内部分上下 2 层:上层是微波磁控管、变压器、风扇等;下层是 1 排喇叭形波导口。2 层间用金属板隔开,以防微波反射损伤设备。

4.3 便携式微波除冰车涂层试验

4.3.1 铺设微波涂层试验段

试验段选择膨胀石墨、四氧化三铁和 RW 作为涂层材料。配置吸波涂层材料悬浮液。试验段选择水泥路面作为涂层载体。清扫路面,并划定每个试验段 1.2 m×0.2 m,在区域内涂抹涂层材料。

4.3.2 现场试验

首先,测量环境温度和地面温度,调试完设备后接通电源,手持扶手推动微波简易除冰车缓慢行驶,行驶速度为 0.05 m/s。同时利用微波泄漏仪反复测试辐射安全区域。试验过程中,利用红外线测温仪沿行驶路线测量,并记录加热后涂层表面的实际温度。

4.3.3 试验段试验结果与分析

试验段微波涂层加热升温对比结果如图 10 所示。由图 10 可知,涂层材料吸收微波升温的效果非常明显,膨胀石墨升温效率最高,四氧化三铁与 RW 相当。可采用膨胀石墨作为涂层材料与便携式微波除冰车配合使用,达到最佳除冰效果。便携式微波除冰车行驶速度为 0.05 m/s,膨胀石墨涂层的温度达到 100 °C 以上,实际应用时,涂层上覆盖的冰层可迅速吸收涂层热量,降低涂层温度。另外,也可根据需要控制涂层膨胀石墨的含量与微波除冰车行驶速度,使膨胀石墨涂层温度上升到 70 °C~80 °C,达到融冰效果即可。

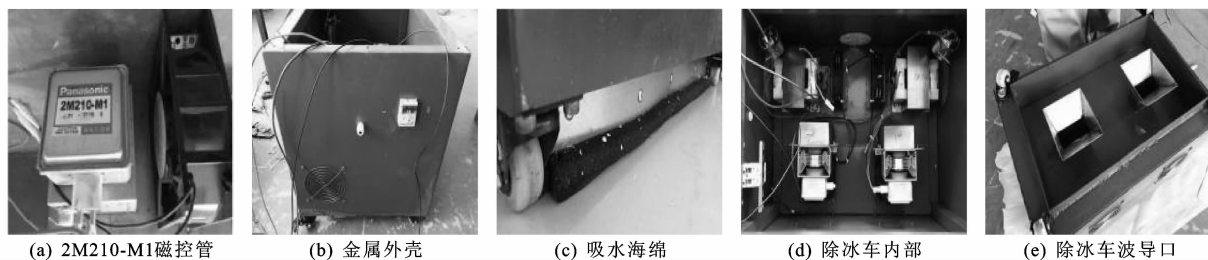


图8 便携式微波除冰车细部图

Fig. 8 Details of a portable microwave deicer

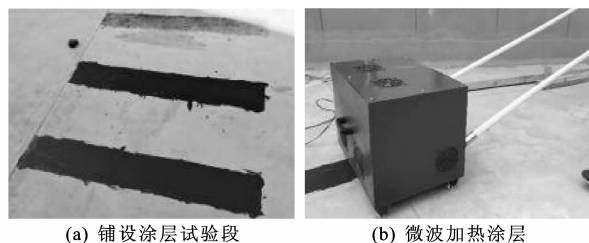


图9 试验段现场试验

Fig. 9 Test sections field test

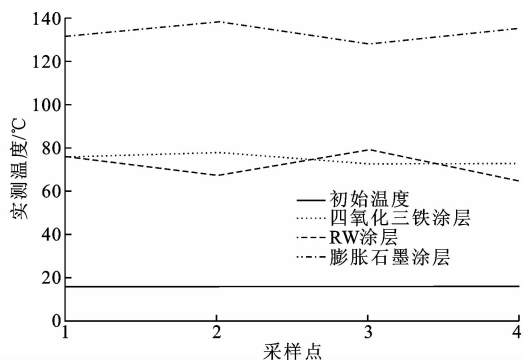


图10 试验段微波涂层加热升温对比

Fig. 10 Comparisons of heating temperatures of microwave coating in test section

5 结 语

(1)基于微波吸收材料的吸波机理,分析了材料吸波性能的影响因素,优选了5种吸波材料进行涂层材料微波融冰试验,得出不同涂层材料吸收微波并升温的能力从大到小依次为膨胀石墨、四氧化三铁、RW、YW1、氧化铝。提出采用膨胀石墨、四氧化三铁和RW这3种材料作为除冰路面微波敏感涂层材料。

(2)通过对四氧化三铁、RW、膨胀石墨进行涂层试件微波加热试验得出,四氧化三铁吸收微波能力略高于RW,膨胀石墨吸收微波升温的能力明显高于四氧化三铁和RW;通过融冰试验得出,膨胀石墨吸收微波融冰的能力远大于四氧化三铁,20 s即可融化厚冰,效果显著,建议选用膨胀石墨作为微波

敏感涂层材料。

(3)基于微波除雪化冰设备技术参数分析,研发了便携式微波除冰车,并进行了现场涂层微波加热试验,提出采用膨胀石墨作为微波敏感涂层材料并与便携式微波除冰车配合应用的方法,试验证实其除冰效果良好。

(4)本文对除雪化冰路面微波敏感涂层材料进行了深入研究,并研发了便携式微波除冰设备,为今后大型微波除冰雪设备的研发提供了理论指导和实践依据。但未考虑对微波除冰车加热后续区域降温恢复结冰问题,下一步将从微波除冰车加热与真空吸冰一体化等方面开展研究。

参考文献:

References:

- [1] 王选仓,陆凯詮.公路路面融雪化冰技术与发展[J].筑路机械与施工机械化 2013,30(1):26-31.
WANG Xuan-cang, LU Kai-quan. Technology and development of snow melting and deicing of highway pavement[J]. Road Construction Machinery & Construction Mechanization, 2013, 30(1): 26-31.
- [2] 姚运仕,闫青青,王瑞龙,等.车载式液态融冰雪剂洒布机洒布质量的控制[J].吉林大学学报:工学版, 2016,46(1):120-125.
YAO Yun-shi, YAN Qing-qing, WANG Rui-long, et al. Spraying quality control of vehicle-mounted sprayer for liquid deicing and snow-melting agent[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2016, 46(1): 120-125.
- [3] 刘长生.我国南方道路除冰装置的研究[J].中南林业科技大学学报,2009,29(4):115-119,149.
LIU Chang-sheng. Research of deicing equipment for China southern highway[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2009, 29(4): 115-119, 149.
- [4] 傅 珍,陆凯詮,王选仓.埋管水热式融雪系统对桥面铺装结构的影响[J].长安大学学报:自然科学版,

- 2014,34(4):70-76.
- FU Zhen, LU Kai-quan, WANG Xuan-cang. Effects of snow melt system with hydrothermal buried pipes on bridge paving[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2014, 34(4): 70-76.
- [5] O'CONNOR A J, KENSHEL O. Experimental evaluation of the scale of fluctuation for spatial variability modeling of chloride-induced reinforced concrete corrosion[J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 18(1): 3-14.
- [6] 魏建国, 傅广文, 付其林. 氯盐融雪剂对沥青结合料路用性能的影响[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(4): 7-13.
- WEI Jian-guo, FU Guang-wen, FU Qi-lin. Influence of chlorine salt snow-melting agent on road performance of asphalt binder[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(4): 7-13.
- [7] 彭建新, 吴婷婷, 胡守旺, 等. 氯盐环境下预应力混凝土梁桥氯离子扩散效应及其空间概率分析[J]. 中国公路学报, 2016, 29(4): 50-58.
- PENG Jian-xin, WU Ting-ting, HU Shou-wang, et al. Effect of chlorides diffusion and its spatial probability analysis of prestressed concrete bridge under chloride environment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(4): 50-58.
- [8] 傅 珍, 王选仓, 陆凯詮. 埋管形式对水热式桥面融雪的影响[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2014, 42(5): 90-96.
- FU Zhen, WANG Xuan-cang, LU Kai-quan. Influence of pipe-burying mode on hydrothermal snow melting of bridge decks[J]. Journal of South China University of Technology; Natural Science Edition, 2014, 42(5): 90-96.
- [9] 陈渊召, 李振霞. 基于复合材料的橡胶颗粒沥青混合料弹性模量预测[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(6): 2609-2616.
- CHEN Yuan-zhao, LI Zhen-xia. Elastic modulus prediction of crumb rubber asphalt mixture based on composite material[J]. Journal of Central South University; Science and Technology, 2013, 44(6): 2609-2616.
- [10] 陈渊召, 李振霞. 基于离散元法的橡胶颗粒沥青混合料微观结构分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(4): 116-121.
- CHEN Yuan-zhao, LI Zhen-xia. Meso-structure of crumb rubber asphalt mixture based on discrete element method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(4): 116-121.
- [11] 周 梅, 赵华民, 徐 秒, 等. 橡胶颗粒掺量及粗细对水泥混凝土路面抗渗及抗冻影响[J]. 公路交通科技, 2015, 32(4): 34-39.
- ZHOU Mei, ZHAO Hua-min, XU Miao, et al. Effects of rubber particle content and fineness on impermeability and salt frost resistance of cement concrete pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(4): 34-39.
- [12] 黄 勇, 高 青, 马纯强, 等. 道路融雪化冰过程冰层的热融特性[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2010, 40(2): 391-396.
- HUANG Yong, GAO Qing, MA Chun-qiang, et al. Heat melting characteristic of ice layer in ice-snow melting process on road pavement[J]. Journal of Jilin University; Engineering and Technology Edition, 2010, 40(2): 391-396.
- [13] 李炎锋, 胡世阳, 武海琴, 等. 发热电缆用于路面融雪化冰的模型[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(12): 1298-1303.
- LI Yan-feng, HU Shi-yang, WU Hai-qin, et al. Modeling and analyzing on the electric heating cable system for deicing and melting snow on road surface[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(12): 1298-1303.
- [14] MAKUL N, RATTANADECHO P, AGRAWAL D K. Applications of microwave energy in cement and concrete—A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 37: 715-733.
- [15] 李 洁. 微波除冰雪技术[J]. 养护与管理, 2016(11): 23-25.
- LI Jie. Microwave deicing and snow technology[J]. Conservation and Management, 2016(11): 23-25.
- [16] 朱松青, 史金飞, 孙铜生. 微波在沥青路面养护中的应用研究[J]. 材料导报, 2007, 21(11A): 286-290.
- ZHU Song-qing, SHI Jin-fei, SUN Tong-sheng. Application of microwave methods to asphalt pavements maintenance[J]. Materials Review, 2007, 21(11A): 286-290.
- [17] HOPSTOCK D M, ZANKO L M. Minnesota taconite as a microwave-absorbing road aggregate material for deicing and pothole patching applications[R]. Duluth: University of Minnesota Duluth, 2004.
- [18] HOPSTOCK D M. Microwave-absorbing road construction and repair material[R]. Duluth: University of Minnesota Duluth, 2003.
- [19] WANG Z, WANG H, AN D, et al. Laboratory investigation on deicing characteristics of asphalt mixtures using magnetite aggregate as microwave-absorbing

- materials[J]. Construction and Building Materials, 2016,124:589-597.
- [20] 关明慧,徐宇工,卢太金,等. 微波加热技术在清除道路积冰中的应用[J]. 北方交通大学学报,2003,27(4):79-83.
GUAN Ming-hui,XU Yu-gong,LU Tai-jin,et al. Application of microwave heating on removing ice on streets[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2003,27(4):79-83.
- [21] 李笑,徐宇工,刘福利. 微波除冰方法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2003,35(11):1342-1343.
LI Xiao,XU Yu-gong,LIU Fu-li. Application of microwave heating for ice removal on streets[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003,35(11):1342-1343.
- [22] 焦生杰,唐相伟,高子渝,等. 微波除冰效率关键技术研究[J]. 中国公路学报,2008,21(6):121-126.
JIAO Sheng-jie,TANG Xiang-wei,GAO Zi-yu,et al. Study of key technology on microwave deicing efficiency[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008,21(6):121-126.
- [23] 焦生杰,唐相伟,高子渝,等. 环境温度对道路微波除冰效率的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版,2008,28(6):85-88.
JIAO Sheng-jie,TANG Xiang-wei,GAO Zi-yu,et al. Influence of environmental temperature on road deicing efficiency using microwave[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008,28(6):85-88.
- [24] 陆松,许金余,白二雷,等. 机场混凝土道面微波除冰仿真与试验研究[J]. 中南大学学报:自然科学版,2017,48(12):3366-3372.
LU Song,XU Jin-yu,BAI Er-lei,et al. Simulation and experimental study of microwave deicing in airport concrete pavement[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2017,48(12):3366-3372.
- [25] LIU K,HUANG S,JIN C,et al. Prediction models of the thermal field on ice-snow melting pavement with electric heating pipes[J]. Applied Thermal Engineering,2017,120:269-276.
- [26] LIU K,HUANG S,WANG F,et al. Energy consumption and utilization rate analysis of automatically snow-melting system in infrastructures by thermal simulation and melting experiments[J]. Cold Regions Science and Technology,2017,138:73-83.
- [27] LIU K,ZHANG X,GUO D,et al. The interlaminar shear failure characteristics of asphalt pavement coupled heating cables[J]. Materials & Structures,2018,51(3):67-85.
- [28] 马爱元,张利波,孙成余,等. 高氯氧化锌烟尘微波介电特性及温升特性[J]. 中南大学学报:自然科学版,2015,46(2):410-415.
MA Ai-yuan,ZHANG Li-bo,SUN Cheng-yu,et al. Microwave dielectric properties and temperature increasing characteristics on zinc oxide dust with high content of Cl[J]. Journal of Central South University: Science and Technology,2015,46(2):410-415.