

文章编号:1671-8879(2008)06-0085-04

环境温度对道路微波除冰效率的影响

焦生杰¹,唐相伟¹,高子渝^{1,2},王 强¹

(1. 长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室,陕西 西安 710064;
2. 佛山市威特公路养护设备有限公司,广东 佛山 528311)

摘 要:为了实现冬季道路微波快速除冰,对微波除冰过程中的路面材料、环境温度、冰厚、冰层杂质含量(质量分数)、微波加热模式和波导口距路面高度等因素对微波除冰效率产生的影响进行了分析;并对关键影响因素之一的环境温度进行了仿真和试验研究。研究表明:相同情况下,环境温度越低,除冰效率就越低;微波加热停止最佳时刻应在路面与冰层结合处温度升至 0℃后、结合处冰层开始融化前,具体时刻要靠实际路况确定。

关键词:筑路机械;道路除冰;微波;仿真试验;除冰效率;环境温度
中图分类号:U418.326 **文献标志码:**A

Influence of environmental temperature on road de-icing efficiency using microwave

JIAO Sheng-jie¹, TANG Xiang-wei¹, GAO Zi-yu^{1,2}, WANG Qiang¹

(1. Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Foshan Witol Highway Maintenance Equipment Limited Corporation, Foshan 528311, Guangdong, China)

Abstract: In order to achieve fast de-icing in winter road maintaining using microwave, the influence factors, such as the road material, environment temperature, thickness of ice, impurity content in ice, heating mode of microwave, distance between road and waveguide and so on, were studied during de-icing process. Then, one of the key influence factors, environment temperature, was analyzed by simulation and experiment. The results indicate that the de-icing efficiency reduces with the falling of environment temperature at the same condition; the best stop time of microwave heating is the moment after the temperature of coalescent ice rising to 0℃ and before ice melting. The certain time should be determined according to actual road condition. 2 tabs, 9 figs, 6 refs.
Key words: road machinery; road de-icing; microwave; simulation test; de-icing efficiency; environmental temperature

0 引 言

冬季道路积冰对交通危害很大,一般的除雪设备清除难度较大,需要专门的清除设备。目前,道路

积冰的清除常用方法有化学法、热力法和机械法 3 种。化学法使用除冰剂等清除道路积冰,使用简单、快捷,但是严重破坏环境,损伤道路,低温下除冰效果不理想;热力法去除道路薄冰效果好,清除道路厚

收稿日期:2007-12-15

基金项目:广东省科技计划项目(2004A10403013)

作者简介:焦生杰(1955-),男,陕西富平人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:jsj@chd.edu.cn.

冰效果不理想,且耗能严重;机械法使用方便,但很难控制好机械装置的破碎力。针对上述除冰方式的不足,国外很早就提出了应用微波来除冰。冰层基本不吸收微波,使用微波照射结冰路面,微波就可以穿过冰层,加热路面材料。路面材料吸收微波,温度升高,热量传递给冰层,首先融化冰与路面结合处冰层,降低冰层与路面的结合力。再用机械装置轻松破碎冰层,在有效地清除道路积冰和保护好道路的同时,实现道路快速除冰。Hopstock 等提出了将铁燧岩作为沥青道路材料,以提高路面表层的微波吸收能力,加速贴近路面的冰层融化,提高微波除冰效率^[1-2]。中国专家使用微波炉做了部分微波除冰方面的室内试验,申请了微波除冰车的专利,在研发沥青路面微波养护车的基础上,进行了微波除冰车的开发^[3-4]。但是,国内外对微波除冰的研究至今没有取得突破性进展,最主要的原因就是除冰效率过低。为此,本文对微波除冰效率的相关因素进行了分析,并使用仿真和试验的方法将环境温度对微波除冰效率的影响进行了仿真和试验研究,得出了环境温度高低和微波除冰效率的关系,为提高微波除冰效率的进一步研究提供了理论指导。

1 微波除冰效率影响因素

微波除冰车在微波频率和电场强度都已经确定的情况下,除冰车的除冰效率与其影响因素的函数关系式为

$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7) \quad (1)$$

式中: y 为除冰效率; x_1 为环境温度; x_2 为路面材料类型; x_3 为冰厚; x_4 为冰层杂质含量(质量分数); x_5 为微波加热模式; x_6 为微波加热墙波导口距路面高度; x_7 为其他可能因素。

1.1 环境温度

环境温度基本和冰层、路面材料温度相同,环境温度不同其实就是冰层和路面材料初温的不同。在做室外道路除冰试验时发现,同样的结冰路面,中午和晚间的除冰效率相差较大。同等情况下,环境温度越低,除冰效率越低。

1.2 路面材料

微波功率在通过物料时被吸收,并转变为热能,物料吸收微波功率的大小可以根据下式计算^[5]

$$P = 0.556 f \epsilon' \tan(\delta) E^2 \times 10^{-12} \quad (2)$$

式中: P 为物料吸收微波功率; f 为微波工作频率; ϵ' 为物料的相对介电常数; $\tan(\delta)$ 为介质损耗角正切; E 为微波电场强度的有效值。

物料在 E 和 f 一定时,吸收微波的热能取决于材料的 $\tan(\delta)$,微波除冰车除冰效率与路面材料的 $\tan(\delta)$ 成正比。

1.3 其他参数

1.3.1 路面冰层厚度

冰层厚度在 2 mm 以下,微波加热结冰路面就很容易造成薄冰融化,融化的水又结成冰,不利于道路除冰。冰层太厚,大于 150 mm,因为微波穿透冰层的损耗加大,所以微波除冰效率同样降低。冰厚为 2~150 mm,具有较高的微波除冰效率。

1.3.2 冰层杂质含量

冰的 $\tan(\delta)$ 很小,基本不吸收微波,冰层基本上是“透明”的。但是,一旦冰层里面含有的杂质,如沙子、灰尘等,杂质就会较强地吸收微波。冰层中杂质含量(质量分数)的多少,杂质在冰层中的位置,对微波除冰效率都有不同程度的影响。如果冰层中杂质主要在冰层的中上层,将会降低微波除冰效率,并且含量越高,效率越低。冰层中杂质主要在冰层的底层,将会提高微波除冰效率。

1.3.3 微波加热模式

沥青混合料是热的不良导体,路面材料吸收微波,温度上升,热量向冰层传递滞后。考虑滞后性,采用微波间歇性加热的方式,可以尽量利用微波加热的热能,提高能量利用率,但降低了除冰效率。

1.3.4 加热墙波导口距路面高度

在仿真和试验中,基本上认为冰层和空气是透明的,实际上空气和冰层对微波是有损耗的。当波导口距离路面过高,就会明显降低微波除冰效率。

微波除冰效率的影响因素很多,本文就其关键影响因素——环境温度进行仿真和试验研究。

2 环境温度影响仿真研究

用 Matlab 模拟不同的环境温度^[6],观察微波加热时,冰层与路面温度变化。在前期试验中,以频率 2.45 GHz 的 2M319K 型磁控管,进行了一系列关于加热 AC-13 沥青混合料的试验。通过试验得出,微波对 AC-13 沥青混合料加热时存在一个温度梯度,其函数关系为

$$\Delta T_0 = 7.5 - 25d \quad (3)$$

式中: ΔT_0 为不同深度处沥青混合料每分钟温升; d 为沥青混合料深度。

由于沥青混合料不同深度吸收的热量存在差别,所以沥青混合料内部不同深度之间有热量传递,沥青混合料还要向冰层传递热量。

2.1 仿真相关参数

一般均匀材料用导热系数(热导率) λ 表征其导热性能。其定义为,在稳态条件下,对 1 m 厚的物体,两侧表面温度差为 1 K 时,单位时间内通过面积为 1 m² 的物体传递的热量,法定单位为 W/(m·K)。仿真所需的相关参数如表 1 所示。

表 1 相关参数值

名 称	导热率 λ / (W·(m·K) ⁻¹)	密度 ρ / (kg·m ⁻³)	比热 c / (kJ·(kg·K) ⁻¹)
空气	3×10^{-4}	1.293	1.005
冰	1.24	0.90×10^3	1.170
沥青混凝土	0.55	2.35×10^3	2.090

假定 x 轴为沿路面深度方向数值, y 轴为温度,冰层与沥青混凝土结合部分在 x 轴 O 点处,结冰路面的坐标如图 1 所示。

根据微波的性质,在其加热时,温度差主要分布在沿深度 x 方向上,在 y 方向温差相对很小。因热量传递而引起的温度变化极小,因此只考虑 x 方向上的热传导,并且在边界条件上设定 $x = d$ 和 $x = D$ 处温度恒等于环境温度。

沿 x 方向对冰和沥青混凝土分层,假设每层的厚度足够小,使这一层上的温度均匀,如图 2 所示,相邻 3 个层次上的平均温度分别为 T_{n-1} 、 T_n 、 T_{n+1} 。

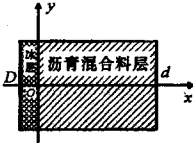


图 1 结冰路面坐标

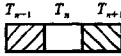


图 2 仿真层的温度

2.2 计算方法

设 t 段时间内的仿真层间热量传递为 Q ,则 Q 的相应计算公式为

$$Q = \varepsilon \Delta T t \tag{4}$$

式中: s 为仿真层间接触面积; ΔT 为仿真层间的温度差。

仿真层的温度升高 $\Delta T'$ 为

$$\Delta T' = \frac{Q}{mct} = \frac{Q}{\rho s d' ct} \tag{5}$$

式中: m 为仿真层的质量; d' 为仿真层的厚度。

将式(4)代入式(5),得到 $\Delta T'$ 为

$$\Delta T' = \frac{\varepsilon}{\rho d' c} \Delta T \tag{6}$$

确定并引入计算系数 $K = \frac{\varepsilon}{\rho d' c}$,得到 $\Delta T' = K \Delta T$ 。代入冰层和沥青混合料的相关参数,得到冰层和沥青混合料的计算系数 K_2 、 K_3 。则 x 方向上,冰

层与沥青混合料界面处温度传导方程为

$$T_n = T'_n + [T'_n - T_{n+1}']K_2 - [T'_n - T_{n-1}']K_3 \tag{7}$$

冰层中温度传导方程为

$$T_n = T'_n + [T'_n - T_{n+1}']K_2 - [T'_n - T_{n-1}']K_2 \tag{8}$$

沥青混合料中温度传导方程为

$$T_n = T'_n + [T'_n - T_{n+1}']K_3 - [T'_n - T_{n-1}']K_3 \tag{9}$$

式中: T'_n 为上一时刻温度; T_n 为当前时刻温度。

将微波加热和因热量传导引起的升温变化相叠加,并将上述计算过程分别按深度和时间变化,输入 Matlab 运行。

2.3 仿真结果

(1)随着微波加热时间的增加,沥青混合料内部温度线是近似平行变化,只有沥青混合料与冰层结合处温度变化较大。

(2)设定冰层厚度为 10 mm,冰层和沥青混合料的初始温度与环境温度相同。当环境温度分别为 -5°C 、 -10°C 、 -15°C 、 -20°C 时,冰层和沥青混合料结合处温度上升到 0°C 时,温度线随加热时间的变化如图 3~图 6 所示。

(3)环境温度越低,冰层和路面结合处温度升到 0°C 的加热时间越长,相应的微波除冰效率就越低。

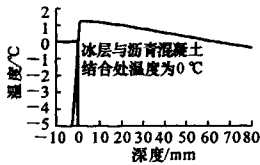


图 3 环境温度 -5°C , 加热 50 s 时的温度线

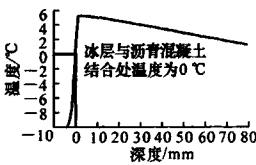


图 4 环境温度 -10°C , 加热 124 s 时的温度线

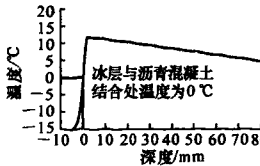


图 5 环境温度 -15°C , 加热 218 s 时的温度线

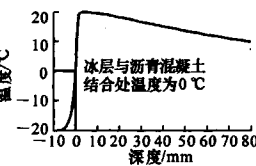


图 6 环境温度 -20°C , 加热 324 s 时的温度线

3 环境温度影响试验

3.1 试验准备

制作 4 块 AC-13 沥青混合料试样,分别埋设 2 个热电偶,热电偶测温点应靠近沥青混合料试样表面 10 mm 以内,如图 7、图 8 所示。

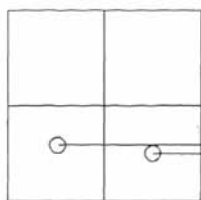


图7 试样埋设热电偶



图8 试样除冰后的效果

试样底面冻制约 5 mm 厚的冰层,温度分别控制在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。4 个 2.45 GHz 磁控管为 2×2 排列,用温度巡检仪,每隔 30 s 记录热电偶测量温度。加热结束后,用铁锤敲开冰层,记录除冰效果。调整加热时间,重复试验。

3.2 试验结果及分析

记录不同初温下冰层在锤击下全部脱落的微波加热时间,取 3 次时间的均值,如表 2 所示。温度巡检仪记录温度数据,取结冰初温为 $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 试样,绘出温度曲线,如图 9 所示。

表2 不同初温下沥青混合料试样除冰时间

初温/ $^{\circ}\text{C}$	-5	-9	-15	-20
时间/s	115	150	190	240

0 ~ t_1 段,试样升温阶段,温升斜率为 k_1 ; $t_1 \sim t_2$ 段,为路面结合处冰层融化脱离阶段,温升斜率为 k_2 ,由于冰融化温度保持不变,则 k_2 约为 0; $t_2 \sim t_3$ 段,为路面结合处冰层已经融化成

水、微波加热含水路面继续升温阶段,温升斜率为 k_3 ; $t_3 \sim t_4$ 段,为路面冰层融化的水已经流出、微波加热路面材料继续升温阶段,温升斜率为 k_4 。

(1) 环境温度越低,0 ~ t_1 段的时间越长;路面表层材料吸收微波升温,一边将热量传导给冰层,一边升温到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,温升斜率基本不变。

(2) $t_1 \sim t_2$ 段,路面结合处冰层吸收热量,路面表层温度保持不变。在 t_1 时刻,路面结合处冰层开始融化;在 t_2 时刻,路面冰层全化成水。微波除冰仅是降低冰层与路面结合力,所以微波加热停止时刻 t 应满足 $\frac{t_1+t_2}{2} < t < t_2$,最佳时刻依实际路况确定。

(3) $t_2 \sim t_3$ 段,因为冰层已经融化成水,水大量吸收微波,所以温升斜率 k_3 很大。

3.3 试验结果

环境温度越低,冰层和沥青混凝土结合处温度

上升到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的时间 t_1 就越长;冰层脱离路面需要的加热时间越长,微波除冰效率就越低。

4 结 语

(1) 在微波除冰车的微波频率和电场强度都已确定的情况下,除冰车的除冰效率由环境温度、路面材料类型、冰厚、冰层杂质含量、微波加热模式和波导口距路面高度等因素决定。

(2) 在其他条件不变的情况下,环境温度越低,微波除冰效率就越低。

(3) 微波加热停止时刻 t 应满足 $\frac{t_1+t_2}{2} < t < t_2$,最佳时刻以实际路况确定。

参考文献:

References:

- [1] Hopstock D M. Microwave-absorbing road construction and repair material[R]. Duluth: University of Minnesota Duluth, 2003.
- [2] Hopstock D M, Zanko L M. Minnesota taconite as a microwave-absorbing road aggregate material for deicing and pothole patching applications[J]. Northland Transporter, 2004, 32(3): 4-6.
- [3] 关明慧,徐宇工,卢太金,等. 微波加热技术在清除道路积雪中的应用[J]. 北方交通大学学报:自然科学版, 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: Natural Science Edition, 2003, 27(4): 79-83.
- [4] 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.
- [5] 张兆镗,钟若青. 微波加热技术基础[M]. 北京:电子工业出版社, 1988.
- [6] 柴光远,韩江桂,刘玲腾. 柴油机排气系统温度的动态仿真[J]. 拖拉机与农用运输车, 2001(3): 8-10.
CHAI Guang-yuan, HAN Jiang-gui, LIU Ling-teng. Thermodynamic cycle simulation for diesel exhaust system[J]. Tractor & Farm Transporter, 2001(3): 8-10.

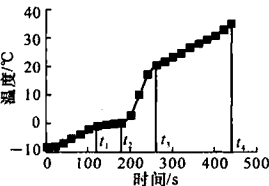


图9 冰层与道路结合面处的温度变化