

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.01.004

# 碳纤维改性道面混凝土微波除冰效率研究

任彪<sup>1</sup>, 许金余<sup>1,2</sup>, 黄河<sup>1</sup>, 王志航<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学, 陕西 西安 710038; 2. 西北工业大学 力学与土木建筑学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 基于混凝土吸波发热特性的微波加热道面除冰是一种环保、经济的道面除冰方法, 但普通混凝土受微波加热效率较低, 这限制了微波除冰的效果。为解决混凝土吸波发热效率低的问题, 通过在混凝土中掺入不同长度及掺量碳纤维材料的方法提高道面混凝土吸波发热效率, 试验研究了不同碳纤维长度及掺量对吸波发热效率的耦合影响, 采用自主研发的开放式微波除冰车和光纤温度传感器对试验技术进行改进, 并对试验结果进行了理论推导和机理分析。结果表明: 将一定量的碳纤维掺入混凝土中能够提升其吸波发热效率, 提升幅度随碳纤维的掺量及长度的变化而变化, 合理运用碳纤维对混凝土进行改性可以达到对路面进行微波除冰的目的; 试件吸波发热的前期热量需要向下传导, 温度上升较慢, 热量传导平衡后, 温升速率逐渐趋于一个定值, 温度稳定上升; 碳纤维改性混凝土有一定的温敏性, 其电磁参数和导热参数随着温度变化而变化, 相关参数的求解方程为超越方程; 在一定范围内, 试件的温升速率随掺入碳纤维长度及掺量的增大而升高, 但当碳纤维掺量过大时, 反而会抑制其吸波发热效率, 碳纤维长度与掺量对混凝土吸波发热效率的影响具有复合作用, 碳纤维掺量为2%, 长度为0.6 mm时, 温升速率最高, 可达0.68 °C/s, 较普通混凝土提高4.8倍。

**关键词:** 道路工程; 道面混凝土; 碳纤维改性; 微波除冰; 发热效率

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2022) 01-0024-06

## Study on Efficiency of Microwave Deicing on Carbon Fiber Modified Pavement Concrete

REN Biao<sup>1</sup>, XU Jin-yu<sup>1,2</sup>, HUANG He<sup>1</sup>, WANG Zhi-hang<sup>1</sup>

(1. Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi 710038, China;

2. School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710072, China)

**Abstract:** Microwave heating pavement deicing based on the microwave absorption and heating characteristics of concrete is an environmental and economic pavement deicing method, but the microwave heating efficiency of ordinary concrete is low, which limits the effect of microwave deicing. In order to solve the problem of low microwave absorption and heating efficiency of concrete, the microwave absorption and heating efficiency of pavement concrete is improved by adding carbon fiber materials with different lengths and amounts into concrete. The coupling influence of different carbon fiber lengths and contents on microwave absorption and heating efficiency is experimentally studied. The experimental technology is improved by using the independently developed open microwave deicing vehicle and optical fiber temperature sensor, and the experimental result is theoretically derived and analyzed. The result shows that (1) Adding a certain amount of carbon fiber into concrete can improve its microwave absorption and heating efficiency, the increase range changes with the content and length of carbon fiber, and the rational use of carbon fiber to modify concrete can achieve the purpose of microwave deicing on pavement. (2) In the early stage of wave absorption and heating of the specimen, the heat needs to be conducted downward, and the temperature rises slowly. After

收稿日期: 2021-05-17

作者简介: 任彪 (1996-), 男, 四川南充人, 硕士研究生. (1305352550@qq.com)

the heat conduction is balanced, the temperature rise rate gradually tends to a fixed value, and the temperature rises steadily. (3) Carbon fiber modified concrete has certain temperature sensitivity, its electromagnetic parameters and thermal conductivity parameters change with the temperature, and the solution equation of relevant parameters is transcendental equation; (4) In a certain range, the temperature rise rate of the specimen increases with the increase of the length and content of carbon fiber, but when the content of carbon fiber is too large, it will inhibit its microwave absorption and heating efficiency. The length and content of carbon fiber have a composite influence on the microwave absorption and heating efficiency of concrete. When the content of carbon fiber is 2‰ and the length is 0.6 mm, the temperature rise rate is the highest, up to 0.68 °C/s, which is 4.8 times higher than that of ordinary concrete.

**Key words:** road engineering; pavement concrete; carbon fiber modification; microwave deicing; heating efficiency

## 0 引言

公路是现代交通的基础, 道面结冰会大幅度降低道面摩擦系数, 影响道面使用安全和效率<sup>[1-2]</sup>。目前通常使用的除冰方法, 诸如化学除冰、机械除冰、热能除冰等都有着或多或少的缺点, 不满足绿色节能的要求<sup>[3-4]</sup>。机械除冰效率低且损伤道面, 化学除冰造价高且腐蚀道面, 热力除冰耗能大且污染环境。微波道面除冰作为一种新型的除冰技术, 是一种经济、绿色、低耗、相容性好的除冰方法, 受到国内外的广泛关注<sup>[5-7]</sup>。微波除冰有着除净率高、经济效益好、不污染环境、不损伤道面等优点, 但是微波对传统混凝土道面加热效率低, 除冰速度慢, 较难推广使用。因此如何有效提升混凝土的吸波发热效率是目前国内外道面微波除冰的研究重点<sup>[8-12]</sup>。

碳纤维是一种高强度高模量纤维, 其含碳量在90%以上, 具有较高的导电性, 并且具有良好的导热性、耐久性、耐腐蚀性<sup>[13]</sup>。据目前的研究结果可知, 将一定量碳纤维掺入混凝土中能显著改善混凝土的吸波加热性能<sup>[14]</sup>, 且由于碳纤维抗拉强度高, 掺入碳纤维之后, 混凝土的强度也能得到一定程度的提升<sup>[15]</sup>。

本研究以碳纤维改性混凝土为对象, 研究了不同碳纤维长度、不同碳纤维掺量对道面吸波发热和吸波除冰过程中的温升速率、温升幅度的影响, 运用自主设计的开放式可调高度微波除冰设备进行微波照射, 为避免微波对金属质温度传感器准确度的影响, 采用光纤传感器测定材料温度随时间变化规律。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

制备碳纤维改性混凝土的原材料为: 水泥、砂、

碎石、拌和水、减水剂、碳纤维。水泥采用西安某水泥集团有限公司的普通硅酸盐水泥 (P. O42.5), 其主要技术指标如表1所示。细骨料采用产自黄河的天然河砂, 为保证级配良好, 将砂过筛, 取0.16~5 mm范围的砂, 其主要技术指标如表2所示。粗骨料选用优质的石灰石碎石, 将粗骨料筛分为大石 (20~40 mm)、中石 (10~20 mm)、小石 (5~10 mm)。为保证级配良好, 将碎石的质量配比设置为, 大石: 中石: 小石=1:1:0.5, 混合所得的粗骨料主要技术指标如表3所示。拌和水采用符合国家标准生活饮用水。减水剂采用某化工集团有限公司所生产的聚羧酸减水剂 (PCA型), 其减水效率为25%~35%, 减水剂掺量与水泥质量的质量比为11:1000。进行试验时选取的碳纤维的长度分别为0.1, 0.3, 0.6 mm。

表1 水泥的主要技术指标

Tab. 1 Main technical indicators of cement

技术指标	密度/ (kg · L <sup>-1</sup> )	细度/%	初凝 时间/h	终凝 时间/h	安定性/%
数值	3.1	1.6	3	12	合格

表2 细骨料 (砂) 的主要技术指标

Tab. 2 Main technical indicators of fine aggregate (sand)

技术指标	密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	堆积密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	细度模数	含泥量/%	级配
数值	2.57	1.47	2.8	0.9	合格

表3 粗骨料 (石子) 的主要技术指标

Tab. 3 Main technical indicators of coarse aggregate (pebble)

技术指标	密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	堆积密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	最大粒径/ mm	含泥量	级配
数值	2.71	1.63	40	0.1	合格

### 1.2 试件制备

依据 JGJ 55—2011 《普通混凝土配合比设计规

程》进行试验所用的混凝土的配合比计算, 所得配合比如表4所示。表中的空隙指的是配合比计算时根据相关参数, 进行理论计算得到的混凝土浇筑后试件内部孔洞、固有微裂缝的体积。

表4 碳纤维改性机场道面混凝土配合比

Tab. 4 Mix proportion of carbon fiber modified airport pavement concrete

组分名称	体积/L	质量/kg
水泥	102	320
水	140	140
砂	230	592
石	508	1 377
减水剂	—	3.52
空隙	20	—
合计	1 000	2 432

在此基础上, 设计不同掺量、不同长度的碳纤维掺入混凝土中, 表5为不同碳纤维掺量及长度的梯度配比设计及编号表。

表5 碳纤维改性混凝土试件明细表

Tab. 5 List of carbon fiber modified concrete specimens

碳纤维 掺量/%	碳纤维长度/mm		
	0.1	0.3	0.6
1	0.1CFC1	0.3CFC1	0.6CFC1
2	0.1CFC2	0.3CFC2	0.6CFC2
3	0.1CFC3	0.3CFC3	0.6CFC3

试验试件根据《混凝土结构工程施工质量验收规范》(GB 50204—2015)制作, 操作步骤如下: 首先, 将细骨料与粗骨料混合, 搅拌均匀后, 加入搅拌机; 然后, 将碳纤维加入水泥中, 搅拌均匀, 倒入搅拌机充分搅拌1 min; 最后将减水剂加入水中, 搅拌均匀后, 加入搅拌机, 搅拌2 min。混凝土在搅拌机中搅拌完毕后, 需置于托盘上用铁锹手工搅拌, 之后将搅拌充分的混凝土加入500 mm×500 mm×50 mm模具中, 再使用振动台使之振捣密实。凝结24 h后利用空气压缩机进行拆模, 拆模后的试件需置于YH-90B标准养护箱内养护28 d后进行试验。

### 1.3 试验仪器及设备

传统的温度传感器多为金属材质, 但金属材质在微波环境下的导热参数变化较大, 无法测出准确的温度, 因此本研究采用YL-PL型无源光纤温度传感器进行测温, 避免了测不准的问题。

早期的微波除冰室内试验采用封闭式微波源进行加热, 但李笑等<sup>[16]</sup>指出封闭式微波源与机场道面

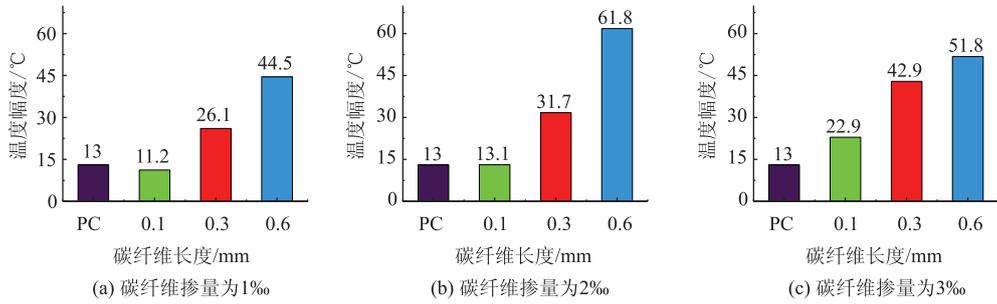
除冰作业时的室外作业有很大区别, 不能真实模拟实际除冰过程, 因此本研究采用了自主研发的开放式微波除冰源, 更加贴近实际除冰过程。

## 2 结果分析

在混凝土试件表面放置光纤温度传感器, 每组试件重复5次试验, 每次试验共观测90 s, 每1 s记录一次温度, 得到不同碳纤维掺量及长度的 $T-t$ 曲线以及各组试件温升幅度柱形图。

### 2.1 碳纤维长度和掺量分别对吸波加热效率的影响

图1为碳纤维掺量分别为1‰, 2‰, 3‰时, 不同长度下试件表面的温升幅度柱形图。图2为碳纤维长度分别为0.1, 0.3, 0.6 mm时, 不同掺量下试件表面的温升幅度柱形图。从图1、图2可以看出: (1) 6幅图中, 掺入碳纤维的混凝土试件的表面温度均高于普通混凝土的表面温度, 但是在碳纤维掺量为1‰时, 碳纤维的掺入导致试件表面温升幅度低于普通混凝土, 随着碳纤维长度的提高, 其温升幅度高于普通混凝土。这说明碳纤维的掺入可以有效提升混凝土的吸波发热效率, 但如果掺入的碳纤维的掺量和长度不适当, 有可能对混凝土吸波发热的效率产生负作用。(2) 在试验中, 试样的表面温度升高幅度随着碳纤维长度的增加而增加, 表明碳纤维长度的增加有利于提高混凝土吸波加热效率, 在一定范围内, 碳纤维掺量的变化不会影响这一结论; (3) 对比图1中3幅图, 不同碳纤维掺量下碳纤维长度对碳纤维混凝土温升幅度的影响各不相同。其中碳纤维掺量为2‰时, 碳纤维长度对碳纤维混凝土的温升幅度影响最大, 表现为在这种碳纤维掺量下, 不同碳纤维长度的碳纤维混凝土温升幅度差值最大。这说明碳纤维掺量为2‰时, 碳纤维长度对吸波发热效率的影响起到更关键的作用, 这是因为碳纤维掺量过大时, 纤维大量搭接, 混凝土吸波性能下降, 而碳纤维掺量过小时, 其改性作用不明显, 纤维掺量为2‰时, 碳纤维的改性作用较为明显。(4) 对比图2中3幅图, 碳纤维长度为0.1 mm时, 碳纤维掺量对其吸波性能几乎没有影响, 碳纤维长度为0.3 mm时, 随着碳纤维掺量的增加, 其吸波性能逐渐增加, 碳纤维长度为0.6 mm时, 随着碳纤维掺量的增加, 其吸波性能先增后减。这说明碳纤维长度会对最优的碳纤维掺量产生影响, 若碳纤维长度过小, 增加碳纤维掺量几乎对混凝土吸波性能没有提升甚至可能产生负作用, 即在一定范围内, 碳纤维长度能够改变碳纤维掺量对吸波发热效率的影响规律。



注: PC 为素混凝土, 下同。

图 1 碳纤维长度对吸波加热效率的影响

Fig. 1 Influence of carbon fiber length on microwave absorbing heating efficiency

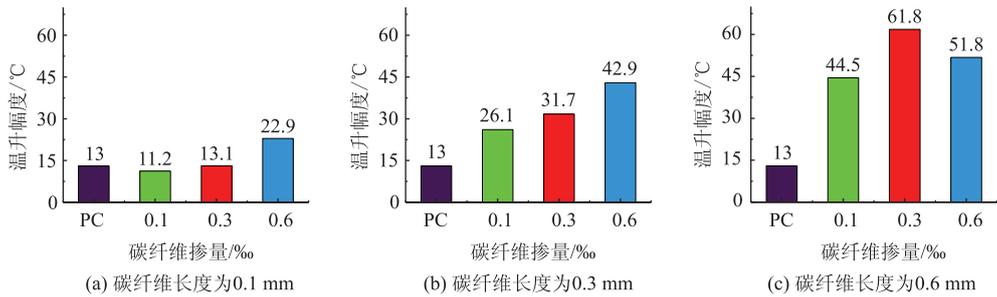


图 2 碳纤维掺量对吸波加热效率的影响

Fig. 2 Influence of carbon fiber content on microwave absorbing heating efficiency

### 2.2 碳纤维掺量及长度对吸波加热效率的影响

图 3 是不同碳纤维掺量及长度下, 混凝土试件表面温升曲线图。从图 3 可以看出: (1) 总体而言, 微波对试件加热后, 随着时间增加, 试件中心点温度逐渐升高, 说明微波照射能够将微波中的电磁能转化为混凝土试件的内能, 混凝土试件可以吸收微波并发热, 进而达到除冰的目的。(2) 在混凝土中掺入碳纤维后, 试件的温升幅度有不同程度的增长, 增长幅度随碳纤维的掺量及长度的变化而变化, 说明一定量碳纤维的掺入能够影响混凝土的吸波发热性能。(3) 各组试件在试验前期温度上升较缓慢, 温升曲线斜率较小, 之后温度上升速率加快, 并最终趋于稳定; 温升曲线斜率增大, 最后接近于直线。

这是由于微波照射初期, 混凝土被加热的同时, 还在向温度较低的区域传递热量, 随着时间推移, 混凝土内部热量传递速率与产热速率达到稳定, 此时温升速率接近一个定值, 温度呈线性趋势上升。(4) 碳纤维长度为 0.1, 0.3 mm 时, 碳纤维混凝土的温升幅度随碳纤维掺量的增加而增加, 但碳纤维长度为 0.6 mm 时, 碳纤维掺量为 3% 的试件温升幅度小于碳纤维掺量为 2% 的试件温升幅度。这说明当碳纤维长度较短时, 碳纤维掺量的增加能明显提升试件的吸波发热效率, 但当碳纤维长度过长时, 碳纤维掺量的继续增加反而降低其吸波发热效率。碳纤维掺量为 2%, 长度为 0.6 mm 时, 试件的温升速率最高为 0.68 °C/s, 较普通混凝土试件提升 4.8 倍, 此时

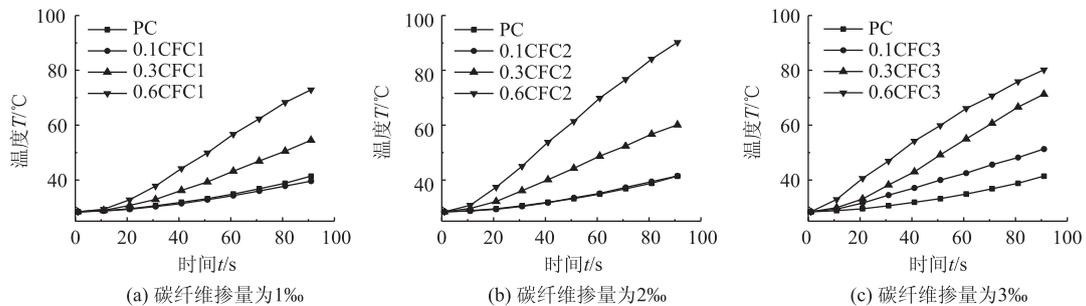


图 3 碳纤维掺量及长度对吸波加热效率的影响

Fig. 3 Influence of content and length of carbon fiber on microwave absorbing heating efficiency

其吸波发热效率最高。(5) 曲线存在交叉的情况, 并且交叉点出现在温度上升的稳定阶段, 说明碳纤维改性混凝土有一定的温度敏感性, 这是由于混凝土的电磁参数及传热参数随温度发生变化导致的。

### 2.3 机理分析

微波作为一种电磁波, 照射在物体表面时会发生反射、折射和透射, 其所带电场在介质内部产生偶极子, 偶极子高频摆动, 互相摩擦, 将电磁场的能量转化为内能。因此, 微波照射在混凝土表面时, 能够使混凝土温度得到一定的升高。在混凝土中掺入碳纤维后, 对其电磁性能产生了一定的影响, 因此能改变其吸波发热效率, 从而提升微波除冰效率。

不同介质电磁参数不同, 对微波的吸收效率不同。本研究以温升速率为指标, 评估不同碳纤维掺量和长度混凝土试件的吸波效率。温升速率可用下式进行计算<sup>[17-18]</sup>:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \nabla^2 T_s + \frac{0.566 \times 10^{-10}}{c\rho} f \varepsilon_{\text{eff}}'' E_{\text{rms}}^2, \quad (1)$$

式中,  $c$  为比热容;  $\lambda$  为导热系数;  $\rho$  为介质密度;  $T_s$  为温度;  $f$  是频率;  $\varepsilon_{\text{eff}}''$  为有效介电常数的虚部;  $\varepsilon_{\text{eff}}''$  和  $E_{\text{rms}}$  为介电参数。

式(1)中  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$  均为温度的函数,  $\varepsilon_{\text{eff}}''$  为温度和频率的函数,  $E_{\text{rms}}$  和介质反射率有关, 而介质反射率又是其介电常数和磁导率的函数, 因此, 混凝土吸收发热的温升速率求解方程是一个超越方程, 对其进行定量求解需要借助于有限元分析软件。对这一超越方程进行定性分析, 并与试验结果进行对比, 可得出以下结论:

(1) 从式(1)中可以看出, 混凝土表面吸收微波生热, 其温升速率主要受到2个方面因素的影响: 一方面是混凝土自身的性质, 如导热系数、介电常数、比热容、密度等; 另一方面是微波照射的频率。

(2) 碳纤维是一种导体, 而混凝土是绝缘体, 一定掺量及长度的碳纤维掺入混凝土后, 能够改善其导电性能。即碳纤维的掺入能够改善混凝土的  $\varepsilon_{\text{eff}}''$  和  $E_{\text{rms}}$  等介电参数, 进而提高混凝土试件的温升速率, 改善其吸波发热效率。

(3) 在微波照射加热初期, 混凝土材料温敏性较为明显, 因此, 温升曲线前10s表现为不规则曲线。此外, 在一定范围内, 微波对绝缘体介质表现为透射而不吸收, 随着导电性能的增加, 介质吸收微波转化为热能的效率逐渐提升。但当导电性能过高, 介质表现为导体时, 微波照射时大部分发生反

射而不吸收, 会降低介质的吸波发热效率。因此, 增加碳纤维长度和掺量均可以提高混凝土的吸波发热性能, 当碳纤维掺量为2‰, 长度为0.6mm时, 吸波发热性能最好, 较普通混凝土提高4.8倍, 但此时继续增加碳纤维长度或掺量会导致混凝土内部大面积发生碳纤维搭接现象, 形成导电闭环, 微波被大量反射而无法被混凝土吸收, 导致吸波发热效率反而降低。

### 3 结论

(1) 在混凝土中掺入一定量的碳纤维可以提升其吸波发热效率, 提升幅度随碳纤维的掺量及长度的变化而变化。但当碳纤维长度较短时, 反而会抑制其吸波发热效率, 合理运用碳纤维改性混凝土可以达到对路面进行微波除冰的目的。

(2) 增加碳纤维长度有利于提升碳纤维改性混凝土吸波发热效率; 在一定范围内增加碳纤维掺量也可以提升碳纤维改性混凝土吸波发热效率, 但当碳纤维掺量过大时, 反而会抑制其吸波发热效率, 碳纤维长度与碳纤维掺量对混凝土吸波发热效率的影响具有复合作用。当碳纤维掺量为2‰, 长度为0.6mm时, 吸波发热效率最高, 较普通混凝土提高4.8倍。

(3) 碳纤维改性混凝土吸波发热的前期热量需要向下传导, 温升速率较低, 温度上升较慢, 热量传导平衡后, 温升速率逐渐变大, 最终趋于一个定值, 温度稳定上升。碳纤维改性混凝土有一定的温度敏感性, 其电磁参数和导热参数随着温度变化而变化。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 刘俊良, 姚天麟, 许金余. 铁黑掺量对混凝土微波除冰效率的影响研究 [J]. 混凝土, 2018 (8): 31-34.  
LIU Jun-liang, YAO Tian-lin, XU Jin-yu. Study of Microwave Deicing Efficiency of Concrete with Various Addition of Iron Black [J]. Concrete, 2018 (8): 31-34.
- [2] 董念清. 中国通用航空发展现状、困境及对策探析 [J]. 北京理工大学学报 (社会科学版), 2014, 16 (1): 110-117.  
DONG Nian-qing. A Research on the Situation, Difficulties and Countermeasures of China's General Aviation Development [J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2014, 16 (1): 110-117.

- [3] 杨光, 王喜峰, 李春武. 高速公路除雪防滑技术 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2005, 22 (11): 6-9.  
YANG Guang, WANG Xi-feng, LI Chun-wu. Snow Removing and Antiskid Technologies of Expressway [J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2005, 22 (11): 6-9.
- [4] 王选仓, 陆凯诠. 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): 25-31.  
WANG Xuan-cang, LU Kai-quan. Technology and Development of Snow Melting and Deicing of Highway Pavement [J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2013, 30 (1): 25-31.
- [5] DING L T, WANG X C, CUI X Z, et al. Development and Performance Research of New Sensitive Materials for Microwave Deicing Pavement at Different Frequencies [J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 181: 103176.
- [6] 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.
- [7] 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 Edition), 2017, 48 (12): 3366-3372.
- [8] 王子宇. 微波技术基础 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.  
WANG Zi-yu. Fundamentals of Microwave Technology [M]. Beijing: Peking University Press, 2003.
- [9] 张瑜, 郝文辉, 高金辉. 微波技术及应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.  
ZHANG Yu, HAO Wen-hui, GAO Jin-hui. Microwave Technology and Application [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2006.
- [10] 唐相伟, 焦生杰, 高子渝, 等. 微波除冰国内外研究现状 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2007, 24 (11): 1-4.  
TANG Xiang-wei, JIAO Sheng-jie, GAO Zi-yu, et al. Research Status Quo of Microwave Ice Removing Technology [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, 24 (11): 1-4.
- [11] GUO H Y, WANG Z J, HUO J Y, et al. Microwave Heating Improvement of Asphalt Mixtures through Optimizing Layer Thickness of Magnetite and Limestone Aggregates [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 273: 123090.
- [12] 詹长书, 陈海涛, 付金超, 等. 东北冰雪路面微波除冰技术探讨 [J]. 林业机械与木工设备, 2011, 39 (6): 26-27.  
ZHAN Chang-shu, CHEN Hai-tao, FU Jin-chao, et al. Microwave-based Ice Removing Technology on the Icy Roads in Northeast China [J]. Forestry Machinery and Woodworking Equipment, 2011, 39 (6): 26-27.
- [13] 王茂章, 贺福. 碳纤维的制造、性质及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1984.  
WANG Mao-zhang, HE Fu. Manufacture, Properties and Application of Carbon Fiber [M]. Beijing: Science Press, 1984.
- [14] 高杰, 张正伟, 韩振强, 等. 电磁波吸收材料用于微波融冰雪路面的研究进展 [J]. 材料导报, 2016, 30 (23): 87-95.  
GAO Jie, ZHANG Zheng-wei, HAN Zhen-qiang, et al. A Review of Electromagnetic Wave Absorbing Materials Used in Microwave Deicing Pavement [J]. Materials Review, 2016, 30 (23): 87-95.
- [15] CHUNG D D L. Cement Reinforced with Short Carbon Fibers: A Multifunctional Material [J]. Composites Part B, 2000, 31 (6/7): 511-526.
- [16] 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.
- [17] 王闯, 李克智, 李贺军, 等. 碳纤维增强水泥基复合材料的吸波性能研究 [J]. 功能材料, 2007, 38 (5): 756-759, 763.  
WANG Chuang, LI Ke-zhi, LI He-jun, et al. Study on Microwave-absorbing Properties of Carbon-fiber-reinforced Cement-based Composites [J]. Journal of Functional Materials, 2007, 38 (5): 756-759, 763.
- [18] 刘士全. 碳纤维沥青路面电磁波吸收层性能研究 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2017, 34 (2): 52-55.  
LIU Shi-quan. Electromagnetic Wave Absorbing Properties of Carbon Fiber Reinforced Asphalt Pavement [J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2017, 34 (2): 52-55.