

文章编号: 1674-8085(2016)03-0070-06

微波加热沥青混合料传热模型研究

陈陆骏, *孙铜生, 许德章

(安徽工程大学机械与汽车工程学院, 安徽, 芜湖 241000)

摘要: 为了得到沥青混合料通过微波加热后表面的温度分布情况, 通过 Maxwell 方程建立了沥青混合料内电场的分布情况, 提出了一种沥青混合料内传热模型的解法, 分析了理论求解传热模型的局限性与困难性。使用仿真和实验的方法, 结果表明: 第一, 理论仿真得到的沥青混合料表面温度高于实验所测得的温度; 第二, 沥青混合料在加热过程中, 加热区域边界处热量散失明显; 第三, 沥青混合料被加热区域表面温度梯度明显, 且仿真所得到的温度分布梯度比实验得到的温度分布梯度大; 第四, 被加热区域沥青混合料最高温度达到了 120℃ 左右也不会出现明显的焦化现象。

关键词: 微波加热; 传热模型; 温度场; 温度测量; 辐射屏蔽

中图分类号: U418.326

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2016.03.013

RESEARCH ON HEAT TRANSFER MODEL OF MICROWAVE HEATING ASPHALT MIXTURES

CHEN Lu-jun, *SUN Tong-sheng, XU De-zhang

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu, Anhui 241000, China)

Abstract: In order to achieve the surface temperature distribution of the asphalt mixture by microwave heating, the equation is established by the Maxwell distribution of the electric field within the asphalt mixture. We propose a solution within the asphalt mixture transfer model. The limitations of the model are solved by analyzing the results in theory. The simulation and experimental methods are used to obtain the temperature distribution on the surface of the asphalt mixture. The theoretical reasons difference between simulation and experimental results are obtained by comparative analysis. Firstly, theoretical simulations on the surface of the asphalt mixture temperature are higher than the measured temperature by experiments. Secondly, during the heating process of asphalt mixture, the heat loss significantly at the heating zone boundary. Thirdly, temperature gradient is evident in the heated zone of the asphalt mixture's surface. Finally, the heated area of asphalt mixture about 120 °C does not appear significant coking phenomenon.

Key words: microwave heating; heat transfer model; temperature field; temperature measurement; radiation shielding

随着我国经济的飞速发展, 高速公路等基础设施也在进一步地完善, 对高速公路的性能也提出了较高的要求, 如对高速公路的使用寿命提出了较高

的要求。在实际的使用过程中, 高速公路会出现各种各样的问题, 包括高速公路中出现的坑槽、裂缝、表面点蚀、断裂等。我国沥青道路现已逐步进入养

收稿日期: 2015-10-10; 修改日期: 2015-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51576001); 安徽省高等学校自然科学基金项目(KJ2015A107); 2014 年安徽省高校优秀青年人才支持计划项目

作者简介: 陈陆骏(1990-), 男, 安徽宣城人, 硕士生, 主要从事机械电子工程的研究(E-mail:chenluj@163.com);

*孙铜生(1981-), 男, 安徽天长人, 副教授, 主要从事智能工程机械研究(E-mail:suntongsheng@ahpu.edu.cn);

许德章(1964-), 男, 安徽芜湖人, 教授, 博士, 主要从事智能机器人研究(E-mail:xdz@ahpu.edu.cn).

护期, 沥青路面的维修和养护面临新的挑战, 具有任务重、难度大、社会关注度高等特点^[1]。为了延长高速公路的使用寿命, 对高速公路进行高质量的现场快速修复提出了新的要求, 也是当今公路的技术人员迫切需要解决和突破的难题。目前, 在很多国家出现了一种以红外线加热现场热再生的修复方式, 这种方法以红外辐射能够通过热传导有效的加热沥青路面表面和内部的沥青而被广泛使用, 同时, 红外辐射能够穿透沥青路面从而对沥青混合料进行加热。但是, 这种加热方法存在着许多的缺点, 如红外加热是从沥青混合料表面开始加热的, 通过热传导的方式使沥青混合料内部温度升高, 这种方式容易使沥青混合料内部未达到施工温度而表面出现焦化, 采用这样的加热方式去修补沥青路面, 其质量将达不到原沥青路面的质量等级^[2-3], 红外加热的方式如图 1 所示^[4]。然而运用微波加热方法能有效地克服上述缺陷, 在微波加热过程中, 由于高频交流电磁场的作用, 内部偶极分子高频往复运动, 产生“内摩擦热”和剧烈运动而使被加热物料温度升高, 是一种内外部同时加热的方式。因而微波加热较红外加热方式具有加热迅速、穿透深、可控制性强、效率高的特点^[5], 成为公路养护技术的重点研究方向, 广泛应用于沥青路面修复工作中。

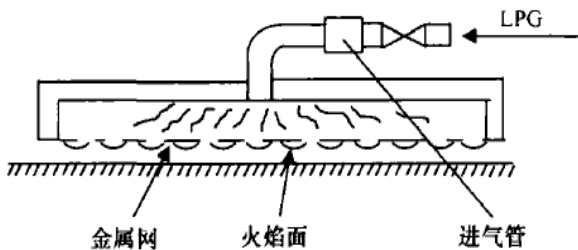


图 1 红外辐射加热再生示意图

Fig.1 Sketch of infrared radiation heating recycling

国外对微波加热再生已开展了一些研究。文献[6]对沥青路面的修补方式进行了研究, 分别采用热料填补、热烘修补和冷料填补的方式, 并针对热料填补的方式进行了研究。文献[7]建立了微波加热沥青混合料热电耦合的模型, 得出了沥青混合料平均温度与微波功率有关的关系。目前, 国内多采用角锥喇叭天线辐射加热沥青路面。为了得到角锥喇叭天线辐射加热口面温度场的分布情况, 利用有限元分析软件进行了仿真, 通过仿真得到沥青混合料内

各点的温度值, 并采用实验的方法, 测得沥青混合料表面的温度值, 将仿真出来的结果和实验结果对比进行分析。

1 微波再生过程传热模型

1.1 微波加热沥青混合料电磁模型

为了提高微波的利用效率, 了解角锥喇叭口面电场的分布, 即沥青混合料加热区域温度场的分布是非常重要的。考虑到沥青混合料加热的特点, 可采用如图 2 所示的角锥喇叭辐射腔式的加热结构。这里的角锥喇叭天线实际上起到三个作用: 作为微波传输线传输电磁波, 产生所需模式的高频电磁波, 提高电磁波的辐射效率^[8]。

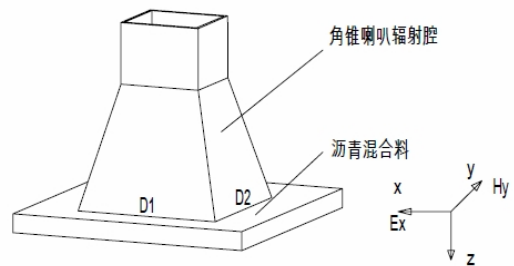


图 2 微波加热再生示意图

Fig.2 Sketch of microwave heating recycling

本文采用图 2 所示的角锥喇叭的口面中心为坐标原点, 磁场方向为 y 方向, 电场方向为 x 方向, 口面轴线(即电磁场的传播方向)为 z 轴建立直角坐标系。控制微波加热沥青混合料的方程是 Maxwell 方程, 根据 Maxwell 方程得

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot D = \rho, \quad \nabla \cdot B = 0 \quad (1)$$

式中, E 为电场强度; D 为电通量密度; H 为磁场强度; B 为磁通量密度; J 为电流密度; ρ 为电荷密度。由文献[9]可以知道, 将 Maxwell 方程方程组和 Helmholtz 方程带入边界条件得到角锥喇叭天线口面电场公式为:

$$E_s = E_0 \cos\left(\frac{\pi x}{D_1}\right) e^{-j\frac{\pi}{\lambda}\left(\frac{x^2}{R_1} + \frac{x^2}{R_2}\right)} \quad (2)$$

式中, E_s 为口面电场强度; E_0 为口面平均电场强

度; R_1 为 H 面内的喇叭长度; R_2 为 E 面内的喇叭长度。

对于沥青混合料, 电场强度 E 、电通量密度 D 、磁场强度 H 、磁通量密度 B 和为电流密度 J 存在以下关系:

$$B = \mu H, \quad D = \varepsilon E, \quad J = \sigma E \quad (3)$$

式中, μ 为磁导率, ε 为介电常数, σ 为电导率。

在微波加热沥青混合料过程中, 如图 2 所示, 电场方向是 x 方向, 磁场方向是 y 方向。如果节点的自由电荷为 0, 在 μ 和 σ 不变的情况下, 沥青混合料内的电磁场分布可以简化, 式(1)可以表示为

$$\begin{cases} \nabla \times E_x = -\mu \frac{\partial}{\partial t} H_y \\ \nabla \times H_y = \sigma E_x + \frac{\partial}{\partial t} \varepsilon(T) E_x \end{cases} \quad (4)$$

式中, 相对复介电常数 $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''_{eff}$ 为温度函数, 其中 ε' 为相对介电常数, ε''_{eff} 为介电损耗因子, T 为沥青混合料的温度。

1.2 微波加热沥青混合料传热模型

在对沥青混合料的加热过程中, 混合料温度不断上升, 其热传导过程是非稳态的。任取一个沥青混合料微元体, 假设混合料的导热系数和密度不随温度变化, 其内部的导热方程为

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \phi = \rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (5)$$

式中, λ 为沥青混合料的导热系数; t 为沥青混合料温度; ϕ 为内热源强度; ρ 为沥青混合料密度; c 为沥青混合料比热容; s 为时间。文献[10]给出了内热源强度 ϕ 为

$$\phi = \omega \varepsilon_0 \varepsilon''_{eff} E^2 \quad (6)$$

式中, ε_0 为真空的介电常数。

在实际的加热过程中, 沥青混合料的温度上升是非常缓慢的, 可以假设沥青混合料的介电常数和比热容的变化呈线性的, 因此可以采用有限元的方法。将加热区域离散成微小的单元, 将整个加热时间离散成若干个时间间隔。求解方程组 (4) 可以得到电场 E 延 x 轴方向的变化规律, 磁场 H 延 y 轴方向的变化规律。将有效电场 E_0 代入公式 (6)

求出内热源强度 ϕ , 将式 (4) 和式 (5) 进行热电偶和, 利用解析法即可求解出沥青混合料内温度值。

用这种方法求出来的温度是一个微小时间段的瞬态值, 如果要求出加热过程中任意时间段的温度, 需要上一个时间段的温度值, 经过迭代的方法求得, 过程很复杂。利用解析法求解热电偶方程也相当困难, 而且在加热过程中, 沥青混合料中的参数会发生相应的变化, 在计算过程中, 很难考虑这些因素, 这就使得求解的结果会出现很大的误差。

2 基于有限元多物理场耦合的仿真与实验

针对以上理论分析的难题, 可以对沥青混合料进行仿真和实验, 本文采用的有限元仿真软件能够进行多场双向直接耦合分析, 可以实现高度精确的数值仿真。该有限元分析软件可以将微分方程 (4) 和方程 (5) 进行热电偶, 求出加热区域沥青混合料的温度分布。

本文选用铝制长喇叭口进行有限元的仿真和实验, 长喇叭口的参数见表 1。采用型号为 2M211 磁控管, 其发射微波频率为 2450G Hz。沥青混合料的初始环境温度为 20 °C, 试样初始温度为 19.6 °C。沥青混合料的参数如下: 导热系数 $k = 3.32 \text{ w/(m}\cdot\text{k)}$, 密度 $\rho = 2502 \text{ kg/m}^3$, 常压热容 $C_P = 0.863 \text{ KJ/(kg}\cdot\text{k)}$

表 1 角锥喇叭结构参数

Table 1 Structure parameters of horn antenna(cm)				
喇叭天线	R_1	R_2	D_1	D_2
结构参数	61	48	15	12

其中, R_1 为 H 面内的喇叭长度, R_2 为 E 面内的喇叭长度。

2.1 有限元软件的加热仿真

仿真时, 加热截止时间为 900 s, 采用连续的加热方式。其中, 从仿真结果中可以得到 0~900 s 内任意时间沥青混合料内的温度值, 本文实验选择加热时间为 900 s。当加热 900 s 时, 沥青混合料内的温度分布如图 3 所示, 沥青混合料表面的温度分布

如图 4 所示。

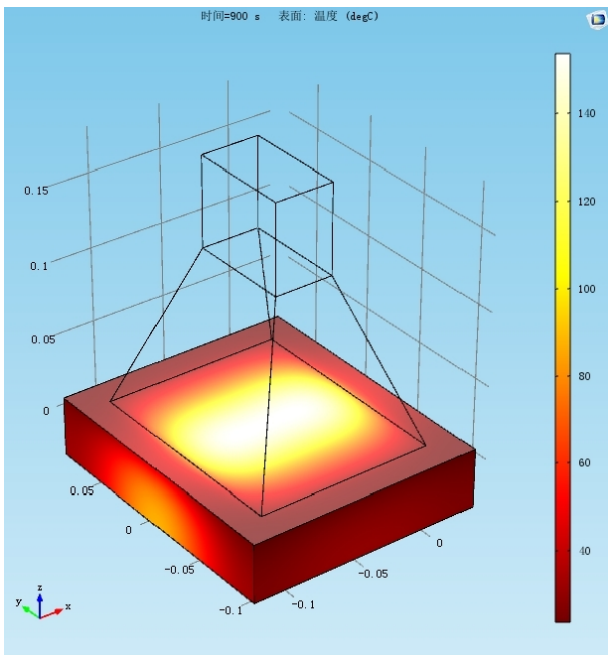


图 3 沥青混合料内的温度分布

Fig.3 The temperature distribution of asphalt mixture

矩阵的形式, 最后将矩阵转换成如图 5 所示的温度场。

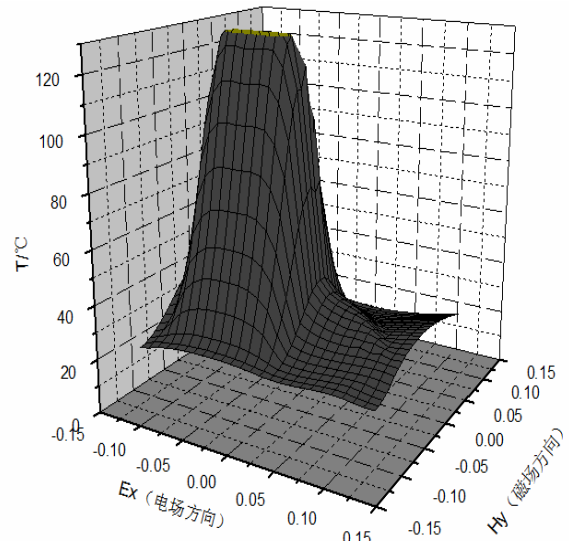


图 5 拟合温度场

Fig.5 Fitting temperature field

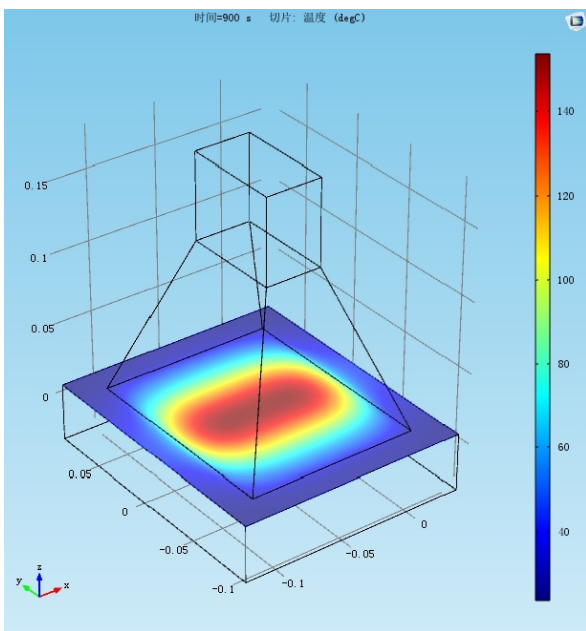


图 4 沥青混合料表面的温度分布

Fig.4 The surface temperature distribution of asphalt mixture

为了能够更加直观方便的观察到沥青混合料被加热区域表面的温度分布情况, 从有限元软件中导出了沥青混合料被加热区域表面各点的温度值。将相应的 x 和 y 坐标以及对应的温度值输入到 origin 对应的列表中 (x 、 y 和温度值对应 origin 列表中的 x 、 y 和 z), 把 z 坐标对应的温度值转换为

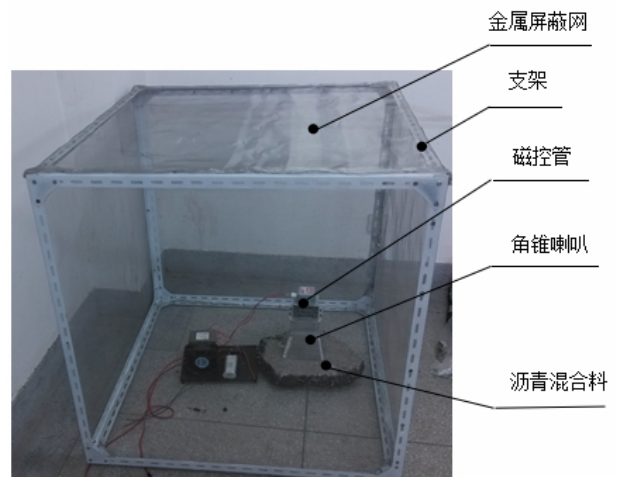


图 6 实验装置

Fig 6 Experimental device

2.2 微波加热沥青混合料实验

微波辐射会对人体和环境造成伤害, 微波加热器在施工过程中必须满足《作业场所微波辐射卫生标注》(GB10436-89)^[11]。为了防止实验过程中电磁波对人体造成伤害, 采用长宽高为 $1500\text{ mm} \times 1500\text{ mm} \times 1500\text{ mm}$ 为支架搭载起来的金属屏蔽网对其进行屏蔽^[12], 用型号为 ML-91 微波漏能仪 (Mcrowave Monitor For Radiation Leakage) 测得在距离实验装置 0.2 m 处微波漏值为 0.37 mW/cm^2 , 对人体的危害忽略不计 (对人体造成伤害的辐射值

为 5 mW/cm^2), 可以正常工作。

本实验将沥青混合料表面被加热区域划分为 10×8 个小的区域, 用红外测温仪 (Infrared Thermometer) 测量沥青混合料表面的温度^[13]。搭建实验装置 (如图 6) 并通电, 加热 900 s 之后, 用红外测温仪测得沥青混合料表面的温度见表 2。从

表 2 的实验数据可以看出, 最高温度 (123.4°C) 出现在口面中心附近, 加热区域边缘处温度没有明显升高, 温度沿电场方向下降较为明显。

采用上述仿真的数据处理方法, 将沥青混合料加热区域表面温度场的实验数据转换成如图 7 所示的温度场。

表 2 温度数据

Table 2 Temperature data($^\circ\text{C}$)

网格号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	23.6	50.2	63.4	66.84	63.8	58.4	53.8	46.4	36.8	31.6
2	33.4	77.2	86.8	90.2	82.6	74.6	63.4	52.4	42.8	35.2
3	48.7	101.8	113.4	113.0	102.4	88.4	70.6	57.6	45.8	37.6
4	53.0	109.0	119.6	120.2	107.2	91.2	63.2	51.8	40.4	33.6
5	115.4	123.4	119.6	103.8	84.6	74.4	61.8	47.8	36.8	32.8
6	88.4	97.2	93.2	85.6	79.4	68.6	54.4	42.2	36.2	29.4
7	60.4	67.6	67.8	68.8	63.2	58.8	51.8	43.6	32.0	28.2
8	26.2	29.8	33.4	28.4	26.2	24.6	22.6	21.6	20.4	19.6

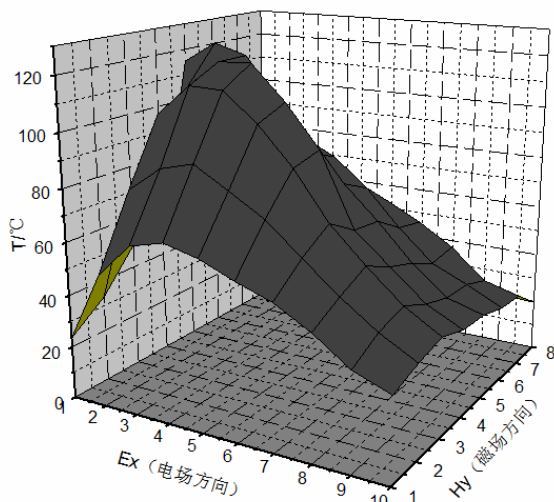


图 7 实验温度场

Fig.7 Experimental temperature field

3 仿真与实验的结果分析

1) 从图 3 可以看出, 微波加热沥青混合料是体加热方式, 温度在深度方向上变化不大, 沥青混合料被加热时, 表面和芯部同时被加热。

2) 从图 4、图 5 和图 7 可以看出, 沥青混合料表面温度分布不均匀, 呈现出中心温度高, 而在被加热区域边界温度低, 并且磁场方向上热量传递快, 温度比电场方向的温度低。因此, 可以考虑降低被加热区域边界处温度的散热速率, 提高温度分

布的均匀性。

3) 从仿真得出的温度场 (图 5) 和实验得出的温度场 (图 7) 可以看出, 第一: 在加热中心处, 仿真得到的温度比实验得到的温度要高约 10°C 。这是因为仿真过程中, 忽略了沥青混合料内参数的变化对温度的影响, 并且仿真得到的温度值是加热 900 s 时的瞬时值, 而实验测数据需要一定的时间, 沥青混合料表面的温度会通过热传递的方式将部分温度传到环境中, 所以, 采用合理的测量方法, 可以提高测量的准确性; 第二: 从图 5 和图 7 中可以看出, 仿真所得到的温度分布梯度比实验得到的温度分布梯度大。这是因为沥青混合料内参数随着沥青混合料内温度的升高, 也会相应的发生变化, 尤其是导热系数, 随着温度的升高, 导热系数也会相应的升高, 这是导致温度分布梯度大的主要原因。

4) 用本文中的角锥喇叭加热腔得到的沥青混合料内的温度分布梯度明显, 在中心处, 局部出现高温, 偏离高温区域后温度出现迅速下降的情况, 而且, 在角锥喇叭口面处沥青混合料几乎没有被加热, 可见该角锥喇叭加热腔加热效果并不理想。

5) 从实验结果来看, 即使被加热区域沥青混合料最高温度达到了 120°C 左右也不会出现明显的焦化现象, 其主要原因是微波加热过程中, 对沥青

混合料温升起主要作用的是聚集料,聚集料吸收微波能后将热量传递给沥青质。

4 结语

本文提出了微波加热沥青混合料的一种传热模型的解法,分析了理论求解传热模型的局限性与困难性,通过对沥青混合料的加热仿真和实验验证,得出了微波加热沥青混合料表面温度的分布情况。分析出了理论仿真和实验结果存在差别的原因,得出微波加热是体加热的特征,以及沥青混合料表面温度梯度明显的具体原因,同时可以得到,该角锥喇叭加热模型加热效果并不理想,实验结果对理论仿真具有现实的指导意义。

参考文献:

- [1] 邓丽芬,邓小青,王亚宁. 城市道路沥青路面养护技术应用研究[J].城市道桥与防洪,2014,3(3):118-121.
- [2] 戴强民. 公路施工机械[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [3] 张永清,贾双盈. 高等级公路沥青路面性能评价方法[J].长安大学学报:自然科学版,2005,25(2):11-15.
- [4] 辛德刚.王哲人高速公路沥青路面材料与结构[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [5] 李善强,王选仓,吴传海. 基于微波加热的沥青混合料路用性能研究[J].公路交通技术, 2013,2(1):31-34.
- [6] 周明强,赵亚航,薛建刚. 沥青路面坑槽微波热料快速修补技术研究[J].道路与交通工程, 2012,4(30):26-31.
- [7] Sun T S. Thermoelectric coupling model for asphalt mixtures based on microwave heating[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2013, 43(4):353-363.
- [8] 孙铜生,史金飞,张志胜. 沥青路面微波热再生传热模型与解法[J].交通工程运输学报,2008,8(5):49-53.
- [9] 朱松青,史金飞,王鸿翔. 沥青路面微波现场热再生模型与实验[J].东南大学学报,2006,36(3):393-396.
- [10] Sun T S, Shi J, Zhu S. Heat transfer model for microwave hot in-place recycling of asphalt pavements[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2008, 24(1): 59-63.
- [11] 熊斌. 微波在路面养护中运用的若干问题探讨[J].道路工程, 2014(4):84-85.
- [12] 陈陆骏,孙铜生,许玉云,等. 一种沥青路面微波热再生实验装置[P].中国专利:ZL201520168620.6, 2015. 03.24.
- [13] Cuccurullo G , Berardi P G , Carfagna R, et al. IR temperature measurements in microwave heating[J]. Infrared physics & technology, 2002, 43(3): 145-150.