

DOI:10.11918/202107081

915 MHz 微波在沥青路面再生加热中的应用

马登成¹,刘成启²,桂 学³

(1.道路施工技术与装备教育部重点实验室(长安大学),西安 710064;2.中铁工程装备集团(天津)有限公司,天津 300480;3.陕西中霖沥青路面养护科技有限公司,西安 710000)

摘要:为验证 915 MHz 微波频率用于沥青路面再生加热的可行性,在分析微波加热机理的基础上,设计了喇叭天线参数并对其进行了优化,采用 CST 仿真软件,进行了 915 MHz 与 2 450 MHz 两种微波频率下单天线与阵列天线对沥青混合料的加热效果对比,同时对不同天线间距、加热高度、混合料厚度等对加热效果的影响因素进行了仿真分析。结果表明:915 MHz 微波频率加热沥青混合料具有更好的均匀性与深度方向上更小的温度梯度;改变天线间距、加热高度和混合料厚度,会导致加热箱内微波相互干涉现象发生变化,进而对加热效果产生影响,当混合料厚度为 250 mm,天线间距为 70 mm×70 mm,加热高度为 70 mm,此时加热效果最好,混合料温度均值最高,且离散系数最低,温度均匀性好,沥青老化现象较少。对于大型微波再生加热设备,由于其要求加热厚度大、产量高,采用 915 MHz 更为合适。

关键词: 沥青路面;微波再生加热;915 MHz;仿真分析

中图分类号: U416.26;U418.6

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2022)09-0044-11

Application of 915 MHz microwave in regenerative heating of asphalt pavement

MA Dengcheng¹, LIU Chengqi², GUI Xue³

(1. Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of Ministry of Education (Chang'an University), Xi'an 710064, China;2. China Railway Engineering Equipment Group (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300480, China;3. Shaanxi Zhonglin Asphalt Pavement Maintenance Technology Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: To verify the feasibility of 915 MHz microwave frequency for regenerative heating of asphalt pavement materials, on the basis of analyzing the microwave heating mechanism, the horn antenna parameters were designed and optimized, and the heating effect of single antenna and array antenna on asphalt mixture under two microwave frequencies of 915 MHz and 2 450 MHz was compared by using CST simulation software. The influencing factors such as antenna spacing, heating height, and mixture thickness on the heating effect were simulated. Results show that the asphalt mixture heated by 915 MHz microwave frequency had better uniformity and a smaller temperature gradient in the depth direction. The variation of the antenna spacing, heating height, and mixture thickness caused changes in the microwave interference phenomenon in the heating box, which in turn affected the heating effect. Under the conditions of mixture thickness 250 mm, antenna spacing 70 mm×70 mm, and heating height 70 mm, the heating effect was the best, the average temperature of the mixture was the highest, and the discrete coefficient was the lowest, with good temperature uniformity and less asphalt aging phenomenon. For large-scale microwave regenerative heating equipment, due to the requirements for large heating thickness and high output, 915 MHz is recommended.

Keywords: asphalt pavement; microwaveregenerative heating; 915 MHz; simulation analysis

废旧沥青路面材料的回收利用是世界各国面临的重大难题,如何对公路废旧沥青路面材料进行更高质量、更充分的再生利用就是人们需要研究的课题。热再生可将路面废旧材料更为有效、充分地利用,且能获得更高的路面再生质量。路面再生过程中,对旧沥青混合料的加热是至关重要的一环,直接影响到再生路面质量^[1-2]。但是传统再生加热方式

是由外向内加热,由于沥青自身导热性差,导致集料表面沥青的老化和碳化,影响新旧料和沥青的融合,还存在粘料、堵料等问题^[3]。而微波加热具有选择性,沥青混合料中的集料是极性分子,微波加热是对集料进行加热,再将温度传递给裹附在其表面的沥青,可以解决沥青老化问题;另外,微波可以辐射到沥青混合料深处,实现表面和深层同时加热,深度方向上温度梯度小,均匀性好^[4-5]。关于微波加热用于沥青路面再生,国内外众多学者进行了很多研究。早在 1973 年,文献[6-7]采用微波加热技术修补了加拿大蒙特利尔和魁北克城之间的高速公路的路面

收稿日期:2021-07-22

基金项目:陕西省自然科学基金面上项目(2017JM5077)

作者简介:马登成(1981—),男,博士,副教授

通信作者:马登成,mdc8235@163.com

裂缝,取得了满意的效果。文献[7]研究了微波加热对沥青混合料性能的影响,通过试验发现,用微波处理沥青混合料能改善沥青与集料间的黏附力,并提高其抗水腐性能,这样可保证路面修补的质量。其他研究^[8-10]也表明:微波加热的方式能够100%地回收沥青混合料并且不影响沥青混合料的二次再生使用,微波加热旧沥青混合料,90%的微波能都可以被其吸收利用,比传统加热减少1/4的能耗。相比传统热再生,微波热再生沥青混合料具有更好的均匀性、高温稳定性、抗裂性能和抗疲劳性能等^[9-14]。此外,文献[15-16]建立了微波加热湿旧沥青混合料内非稳态传热传质数学模型,并进行了实验验证。文献[17]对比了2 450 MHz和5 800 MHz两种频率下加热沥青混合料的效果,发现后者的加热效率是前者的3倍多,但是加热深度上后者仅是前者的70%左右;另外,2 450 MHz微波不会影响再生后沥青路面路用性能,而5 800 MHz频率下再生后沥青路面的路用性能有所减弱。文献[18]对天线尺寸进行了优化,优化后的天线加热效果有较大的提升,并且通过仿真分析了不同因素对沥青混合料加热效果的影响。文献[19]提出了使用径向螺旋天线加热沥青混合料,并取得了一定的成果。文献[20-23]对微波在愈合沥青路面裂缝和吸波材料进行了研究,发现微波有助于沥青路面裂缝的愈合,另外,在混合料中添加吸波材料有助于混合料对微波的吸收,提高加热效率。

现有沥青路面微波再生加热设备主要是小功率养护设备,微波频率是2 450 MHz,由于该频率的微波磁控管最大功率只有10 kW,如果对于大型设备,则需要几十甚至上百个磁控管,这对于设备制造与微波散热都带来不小的挑战,因此限制了大型微波再生加热设备的研发。而915 MHz微波磁控管最大功率可达110 kW,并且为分体式设计,便于散热与天线布置,目前已广泛应用于工业加热当中,但是作为沥青路面再生设备的热源尚未有报道。因此,本文为了解决目前沥青路面热再生中传统加热中存在的问题,采用计算机模拟的方法,对不同微波频率下微波加热沥青混合料加热效果进行比较,开展915 MHz微波磁控管应用于沥青路面再生加热中的可能,同时为大型微波再生加热设备的研究提供依据。

1 微波加热机理

微波加热沥青混合料,通常采用角锥喇叭天线作为辐射器。以角锥喇叭天线端口为XY平面,微波传播方向为Z轴,建立直角坐标系,如图1所示。

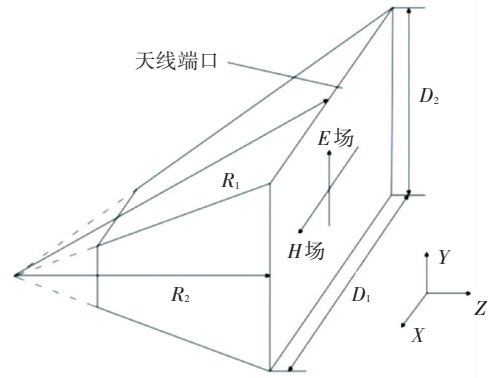


图1 角锥喇叭天线

Fig.1 Pyramid horn antenna

将麦克斯韦方程和亥姆霍兹方程代入边界条件(天线内壁切向电场为0),得角锥喇叭天线端口电场公式为

$$E_s = E_0 \cos\left(\frac{\pi x}{D_1}\right) e^{-j\pi\sqrt{\left(\frac{x^2}{R_1^2} + \frac{y^2}{R_2^2}\right)} \quad (1)$$

式中: E_s 为天线端口面电场场强, E_0 为天线端口面平均电场场强, λ 为电磁波波长, R_1 为H面内喇叭长度, R_2 为E面内喇叭长度。

微波在介质内的耗散功率 P_d 的计算公式为

$$P_d = \pi f \varepsilon_0 \varepsilon' E^2 \tan \delta \quad (2)$$

式中: ε_0 为真空介电常数, ε' 为介质的相对介电常数, f 为微波频率, E 为电场有效值, $\tan \delta = \varepsilon''/\varepsilon'$ 为介质损耗角正切, ε'' 为介质损耗因子。

由式(2)可知,耗散功率与频率、电场强度及材料自身性质有关,频率和输入功率越大,耗散功率越大,加热效率越高。材料自身的介质损耗因子越大,材料吸收能量越快,加热效率越高。

微波可穿透沥青混合料对其深层加热,当功率衰减至表面值的1/e时微波穿透深度 D_p 的计算公式为

$$D_p = \frac{\lambda_0 (\varepsilon')^{0.5}}{2\pi \varepsilon''} \quad (3)$$

式中 λ_0 为微波波长。

可知,加热深度与波长成正比。因此,在加热大厚度的材料时,应选用波长长的微波。

2 两种微波频率加热对比

2.1 仿真建模与参数设置

考虑到安装、散热以及天线的布置等因素,采用折弯90°的角锥形喇叭天线,如图2所示。 a 、 b 分别为矩形波导的长边和短边, D_1 、 D_2 分别为天线端口尺寸。

矩形波导中可以传输 TM_{mn} 模和 TE_{mn} 模, m 、 n 分

别为矩形波导长边和短边方向的驻波数,因此波导中可以存在许多模式。众多模式中主模为 TE_{10} , 场结构简单、简单,易于实现单模传输。在确定矩形波导的截面尺寸时,根据设计原则, a, b 的值可选为^[19]

$$0.7\lambda < a < \lambda, b < 0.5\lambda \quad (4)$$

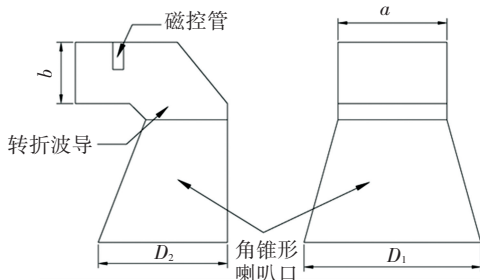


图 2 折弯 90° 的角锥喇叭天线

Fig.2 Pyramid horn antenna with 90° bending

目前加热沥青路面的微波频率主要采用 2 450 MHz, 915 MHz 的还未在该领域应用, 因此本文进行仿真研究, 以分析 915 MHz 在该领域应用的可能。

根据天线设计原则, 2 450 MHz 频率的波长为 122 mm, 915 MHz 频率的波长为 328 mm, 代入式 (4) 得 915 MHz 天线应满足:

$$229 \text{ mm} < a < 328 \text{ mm}, b < 164 \text{ mm} \quad (5)$$

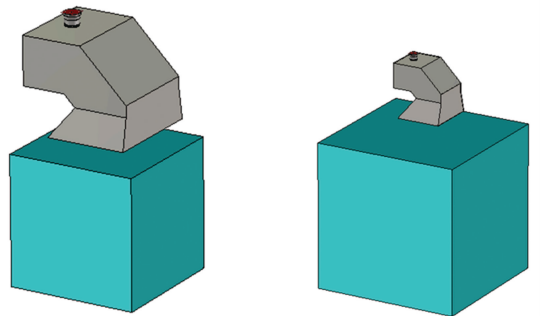
2 450 MHz 天线应满足:

$$85 \text{ mm} < a < 122 \text{ mm}, b < 61 \text{ mm} \quad (6)$$

根据式 (5)、(6), 915 MHz 频率的微波天线尺寸初步选取 a 为 248 mm, b 为 126 mm, D_1 为 280 mm, D_2 为 210 mm; 2 450 MHz 频率的微波天线尺寸初步选取 a 为 90 mm, b 为 59 mm, D_1 为 118 mm, D_2 为 105 mm。

在 CST 中建立单天线加热模型, 本文是对沥青路面回收料进行加热, 体积与厚度大, 沥青混合料模型尺寸为 350 mm×350 mm×350 mm, 沥青混合料的相对介电常数为 8.5, 磁导率为 1, 损耗角正切为 0.034^[17], 天线端口与沥青混合料表面的距离设为 50 mm。分别建立 915 MHz 和 2 450 MHz 两个频率的加热模型, 如图 3 所示。在 CST MICROWAVE STUDIO 中进行微波场仿真后将仿真结果导入 CST MPHYSICS STUDIO 进行温度场仿真。在温度场仿真中, 可设置功率、加热时间、沥青混合料初始温度和环境温度。

915 MHz 频率可大功率输出, 设置功率为 10 kW, 加热时间为 300 s; 2 450 MHz 频率设置功率为 1 kW, 加热时间为 3 000 s, 两个模型的获得总能量相等。初始温度和环境温度均设为 0 °C。



(a) 915 MHz 天线模型

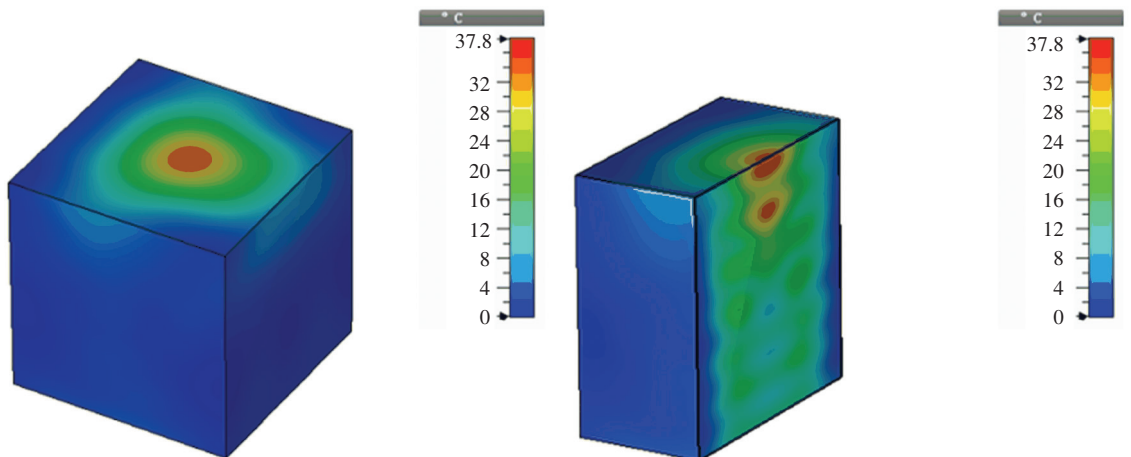
(b) 2 450 MHz 天线模型

图 3 两种频率的加热模型

Fig.3 Heating models under two frequencies

2.2 加热效率与均匀性对比分析

两种频率下沥青混合料温度云图如图 4 和图 5 所示。



(a) 整体温度云图

(b) 深度方向温度云图

图 4 915 MHz 单天线微波加热温度分布云图

Fig.4 Microwave heating temperature cloud map of 915 MHz single antenna

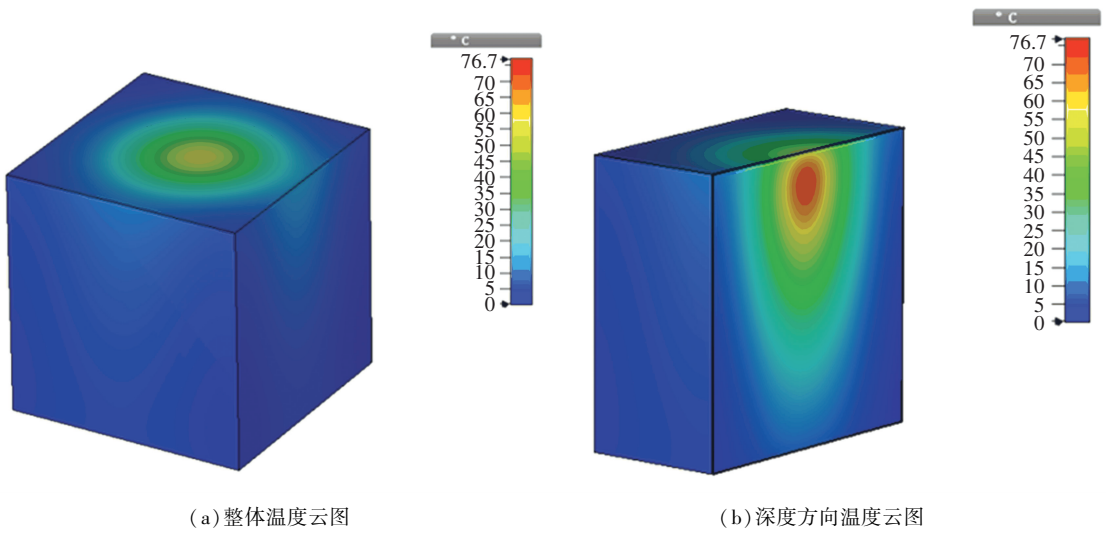


图5 2 450 MHz 单天线微波加热温度云图

Fig.5 Microwave heating temperature cloud map of 2 450 MHz single antenna

计算出两种频率下沥青混合料模型整体的温度平均值、标准差和离散系数,见表1。将沥青混合料沿深度方向的温度均值拟合成曲线,如图6所示,图中的 y vs. x 为坐标值(y, x)。

表1 不同频率单天线加热温度对比

Tab.1 Comparison of heating temperature of single antenna under different frequencies

频率/MHz	平均温度/°C	标准差	离散系数
915	8.46	5.63	0.67
2 450	11.90	10.60	0.89

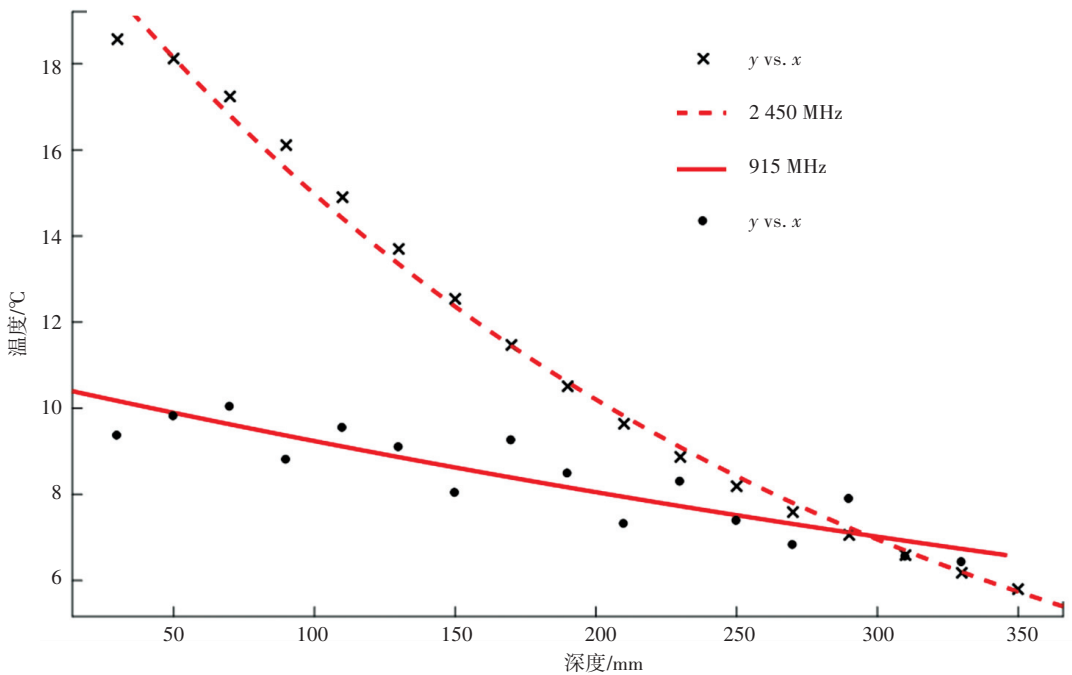


图6 单天线深度方向温度均值拟合

Fig.6 Fitting of average temperature of single antenna in depth direction

从图4、5可知,915 MHz 最大温升为 37.8 °C, 2 450 MHz下为 76.7 °C,后者加热温度更高。从整体来看,两种频率下加热的沥青混合料端口正对的下方温度最高,向四周逐渐降低;从深度方向看,915 MHz频率下沥青混合料的平均温度为 8.46 °C, 2 450 MHz 频率下沥青混合料的平均温度为

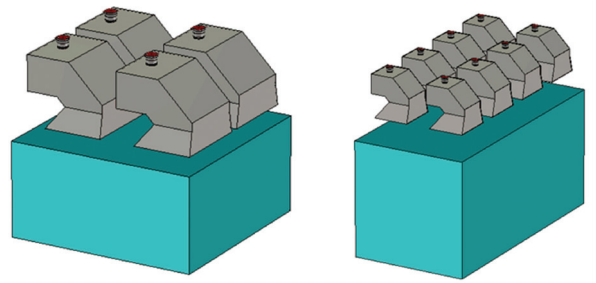
11.9 °C,虽然后者加热沥青混合料效率更高,但是前者加热沥青混合料的离散系数为 0.67,低于后者的 0.89,说明 915 MHz 的微波频率加热沥青混合料的均匀性更好;从图6也可看出,915 MHz 微波加热沥青混合料在深度方向上温度梯度更小,加热更均匀,能有效避免微波加热时沥青混合料的局部老化,

有利于大厚度沥青混合料的加热。

2.3 两种频率下的天线阵列对比分析

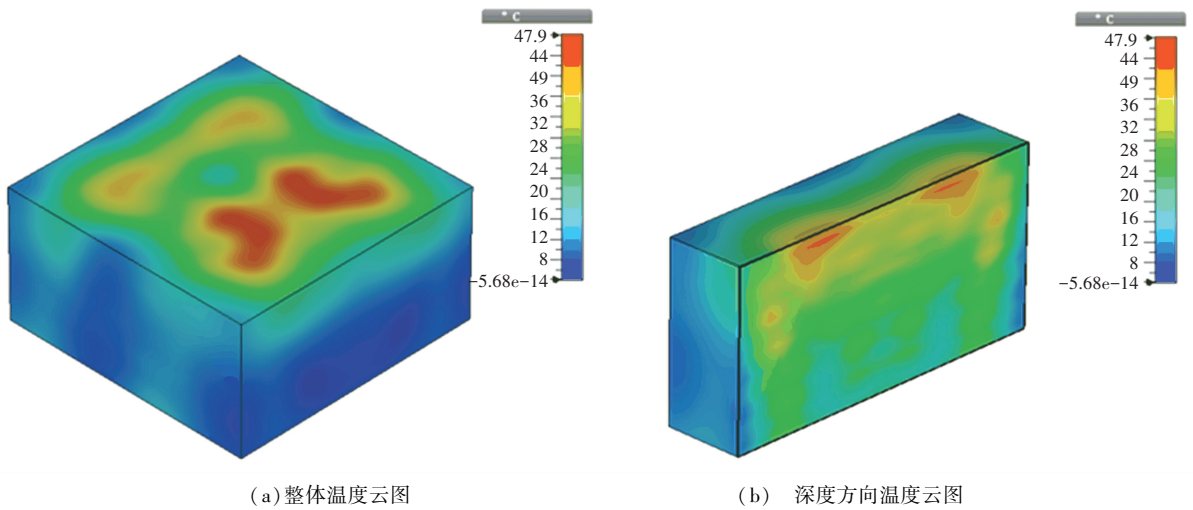
实际应用中,采用天线阵列对沥青混合料进行加热,不同天线辐射出的电磁波会存在叠加等现象,所以单个天线与天线阵列加热的效果会有所区别。因此,需要对两种频率下的天线阵列进一步分析。采用 4 个 915 MHz 频率的天线并排对沥青混合料进行加热,沥青混合料模型尺寸为 700 mm×700 mm×350 mm;采用 8 个 2 450 MHz 频率的天线并排对沥青混合料进行加热,沥青混合料模型尺寸为 700 mm×350 mm×350 mm。设置 915 MHz 频率下天线的功率为 10 kW,加热时间 600 s,2 450 MHz 频率下天线的功率为 1 kW,加热时间为 1 500 s,915 MHz 频率加热沥青混合料模型是 2 450 MHz 频

率的两倍,获得的能量也是两倍。两种频率下加热模型如图 7 所示,仿真后得到的沥青混合料温度云图如图 8、9 所示。



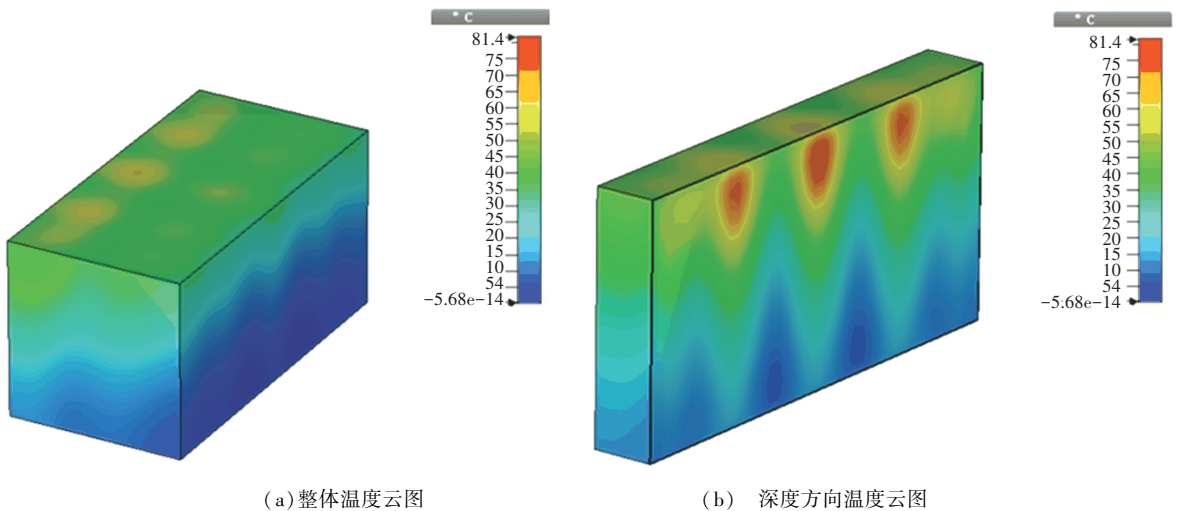
(a) 915 MHz 天线阵列加热模型 (b) 2 450 MHz 天线阵列加热模型
图 7 两种频率下阵列加热模型

Fig.7 Array heating models under two frequencies



(a) 整体温度云图 (b) 深度方向温度云图
图 8 915 MHz 天线阵列微波加热温度云图

Fig.8 Microwave heating temperature cloud map of 915 MHz antenna array



(a) 整体温度云图 (b) 深度方向温度云图
图 9 2 450 MHz 天线阵列微波加热温度云图

Fig.9 Microwave heating temperature cloud map of 2 450 MHz antenna array

计算两个频率下沥青混合料整体的温度平均值、标准差和离散系数,见表 2。将沥青混合料

沿深度方向的温度均值拟合曲线,如图 10 所示。

表2 不同频率天线阵列加热温度对比

Tab.2 Comparison of heating temperature of antenna array under different frequencies

频率/MHz	平均温度/℃	标准差	离散系数
915	20.39	9.66	0.47
2 450	25.78	13.65	0.53

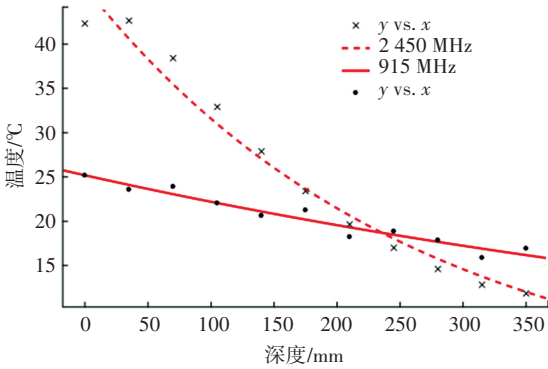


图10 天线阵列深度方向温度均值拟合

Fig.10 Fitting of average temperature of antenna array in depth direction

从图8、9可知,915 MHz与2450 MHz频率微波加热沥青混合料的最大温升分别为47.9℃与81.4℃。从整体来看,两种频率下加热的沥青混合料端口正对的下方温度最高;深度方向上,915 MHz频率加热的沥青混合料表层与底部温差较小,温度更均匀;而2450 MHz频率加热的沥青混合料表层与底部温差较大,可以看出底部的温度较低,均匀性差;如实现底部温度达到要求,则需要长时间加热,但是这样会导致浅层部位沥青混合料过热老化。915 MHz与2450 MHz频率加热沥青混合料的平均温度分别为20.39℃与25.78℃,显示2450 MHz频率下加热效率更高,但是915 MHz频率下,天线阵列加热沥青混合料的离散系数为0.47,小于2450 MHz频率下的0.53,说明915 MHz频率天线阵列加热沥青混合料的均匀性更好。从图10也可看出,915 MHz频率下,天线阵列加热沥青混合料在深度方向上温度梯度更小,加热更均匀。

现有的沥青路面微波加热设备主要是针对路面坑槽、裂缝的修补,是对沥青路面的就地加热再生,沥青面层厚度一般不超过15 cm,而且要将沥青路面从常温加热到150~160℃,温升大,所以在此种情况下采用2450 MHz频率更合适。而本文主要针对沥青路面厂拌热再生,需要将旧沥青路面铣刨收集后对大量旧沥青混合料加热,产量高,同时受热再生设备自身空间限制,需要在有限的空间内被加热的旧沥青混合料铺层厚度大、体积大,加热时的温度梯度小、加热均匀,在该工况下915 MHz频率更合适,微波再生加热设备如图11所示。同时,本研究

也能用于沥青路面就地热再生中沥青路面铣刨收集后的二次集中加热。另外,915 MHz频率下微波加热沥青混合料的温度均匀性更好,尤其在垂直方向上,温度梯度要小。且915 MHz微波频率的磁控管可以实现大功率输出。因此,对于大型微波再生加热设备,由于其加热厚度大,采用915 MHz更为合适,目前该类设备在国内仍属空白,本文的研究能为该类设备的研发提供理论依据。

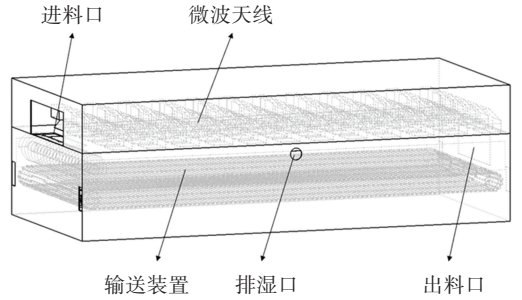


图11 微波加热设备结构示意图

Fig.11 Schematic diagram of structure of microwave heating equipment

2.4 天线的结构优化

在天线其他尺寸不变的情况下,对不同尺寸端口的天线进行比较,得出最合适的端口尺寸。在对加热模型进行微波场仿真后,可以查看 S_{11} 值, S_{11} 值代表回波损耗, S_{11} 值越小,说明辐射出去的微波反射回来的越少,越多的微波能量被沥青混合料吸收,能量利用率越高,即对天线进行优化时,目标是 S_{11} 值最小。

设置 D_1 取值270 mm、280 mm、290 mm, D_2 取值210 mm、220 mm、230 mm、240 mm,分别进行仿真,结果如图12所示。

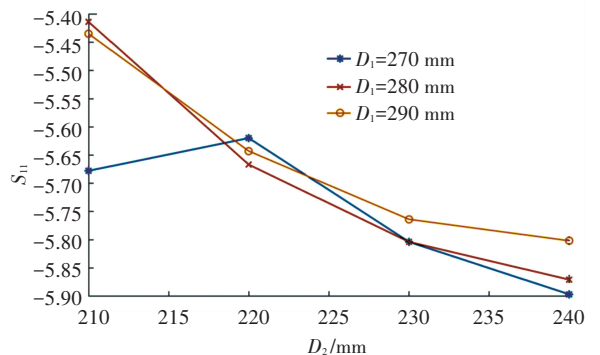


图12 不同端口大小对应的 S_{11} 值

Fig.12 S_{11} values corresponding to different port sizes

由图12可以看出,当 D_1 一定时, S_{11} 值随着 D_2 的增大呈减小的趋势,说明在所选范围内 D_2 值越大越好。当天线端口为270 mm×240 mm时, S_{11} 值最小,说明在此尺寸下回波损耗最小,即有更多的微波能被沥青混合料吸收。因此,确定天线端口为270 mm×240 mm。

根据波导传输理论,波导宽边中心处电场强度最大,磁控管在矩形波导中产生高频电磁场,并且向矩形波导的两侧传输,矩形波导的一侧为短路面,另一侧设置反射板,将电磁波的传输方向改为向下,从而辐射到沥青混合料中。当矩形波导尺寸确定时,调节天线与短路面之间的间距 d ,可以实现最佳激励,如图 13 所示。

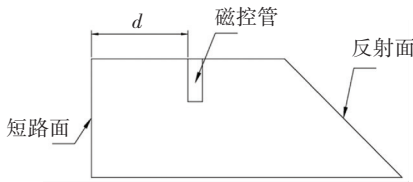
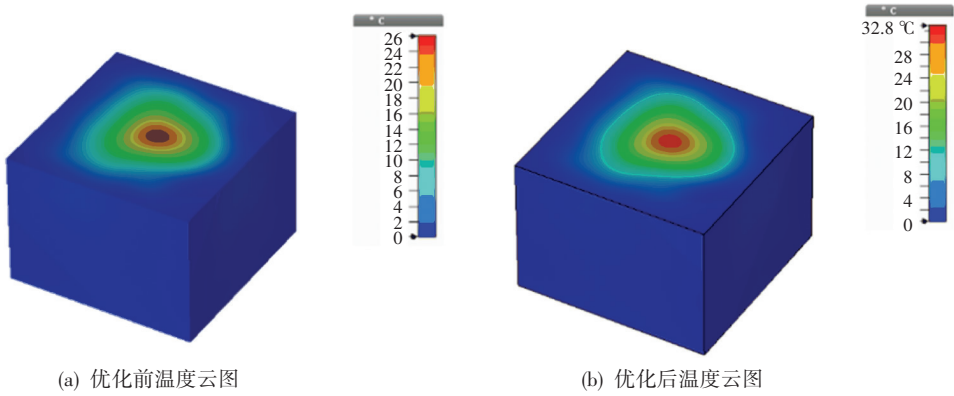


图 13 波导与磁控管位置示意图

Fig. 13 Schematic diagram of position of waveguide and magnetron

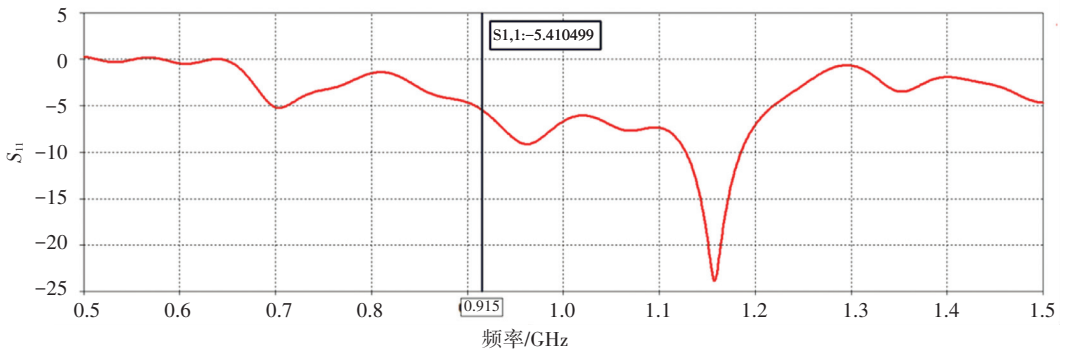
由波导理论可知,矩形波导长边中心处电场强度最大,磁控管应安装在该位置;同时,当磁控管与短路面间距为波长的 $1/4$ 时,可形成纯驻波形式,设置磁控管与短路面的初始距离 $d = 0.25\lambda$, 即 82 mm ,同时以 10 mm 为步长向两端平移,通过仿真得出磁控管与短路面距离为 $62、72、82、92、102、112、122 \text{ mm}$ 时,对应 S_{11} 值分别为 $-5.879、-6.452、-7.405、-8.21、-8.717、-8.807、-8.391$ 。可见,当 $d = 112 \text{ mm}$ 时,对应 S_{11} 值最小,说明此时的回波损耗最小,即有更多的微波能量被沥青混合料吸收。因此,确定 $d = 112 \text{ mm}$ 。

最终确定天线的尺寸为 $a = 248 \text{ mm}$, $b = 126 \text{ mm}$, $D_1 = 270 \text{ mm}$, $D_2 = 240 \text{ mm}$, $d = 112 \text{ mm}$ 。优化前后的天线对沥青混合料的加热效果如图 14 所示。

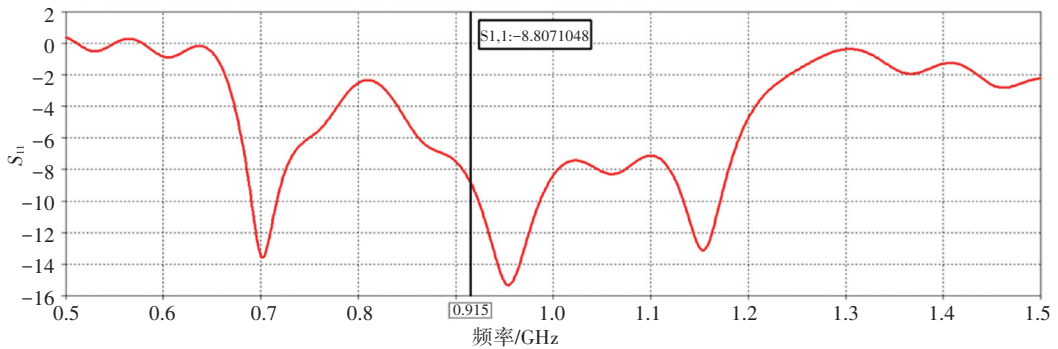


(a) 优化前温度云图

(b) 优化后温度云图



(c) 优化前 S_{11} 值



(d) 优化后 S_{11} 值

图 14 优化前后加热效果对比

Fig. 14 Comparison of heating effect before and after optimization

通过对天线端口大小和磁控管与短路面间距的优化,相比于优化前的天线模型,优化后的天线模型在加热沥青混合料时,最大温升由 26 °C 提高到了 32.8 °C, S_{11} 由 -5.414 降低到了 -8.807,有更多的微波能被沥青混合料吸收,说明优化后的天线对沥青混合料的加热效果更好。

3 915 MHz 微波加热沥青混合料影响因素仿真分析

微波加热沥青混合料时,天线间距、加热高度及混合料厚度等都会对加热效果产生影响。为研究各影响因素对加热效果的影响,设置 5 种天线间距: 30 mm×30 mm、40 mm×40 mm、50 mm×50 mm、60 mm×60 mm、70 mm×70 mm; 5 种加热高度: 30 mm、40 mm、50 mm、60 mm、70 mm; 混合料厚度分别为 250 mm、350 mm、450 mm 进行正交实验仿真。仿真不同混合料厚度加热模型时,为使出料量相同,加热时间也随之改变,以 350 mm 厚的加热时间为 600 s 为基础,250 mm 和 450 mm 厚时加热时间分别为 429 s 和 772 s,建立 3×3 天线阵列仿真模型,沥青混合料尺寸为 1 025 mm×1 050 mm×350 mm。天线并排排布,仿真模型如图 15 所示。

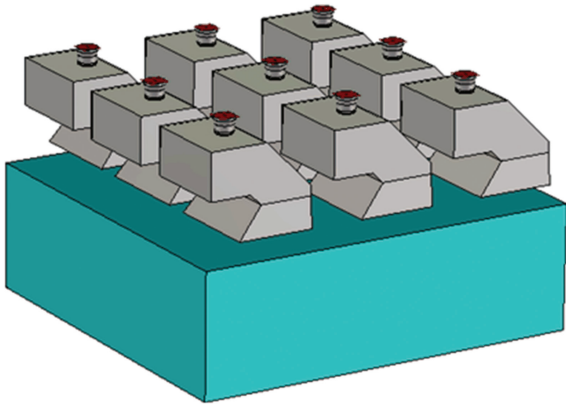


图 15 天线阵列仿真模型

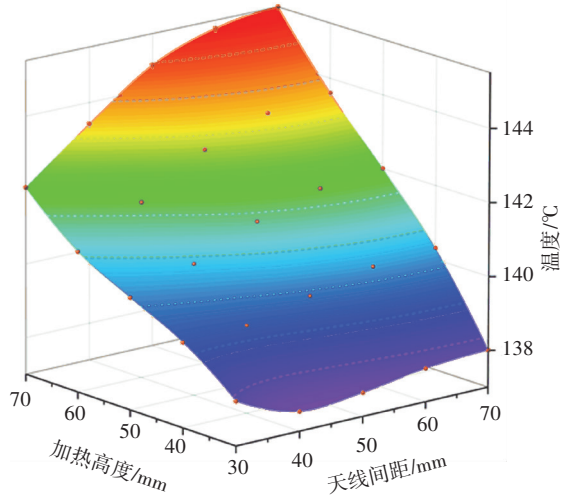
Fig.15 Antenna array simulation model

3.1 混合料厚度为 250 mm 时仿真结果

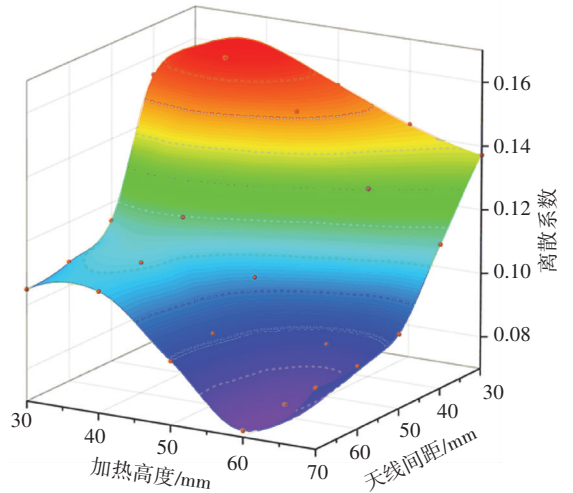
混合料厚度为 250 mm 时,对 5 种天线间距和 5 种加热高度,共 25 组模型进行仿真,计算出各组温度均值、标准差及离散系数,结果如图 16 所示。

由图 16(a)可知,厚度 250 mm 时,天线间距一定时,混合料整体温度均值随加热高度的增大而增大;天线间距越大,温度均值增加的速率随加热高度的增加而增加。加热高度一定时,温度均值随天线间距的增大呈上升趋势。同时增大天线间距和加热高度,温度均值随之升高。总的来看,天线间距为 70 mm×70 mm,加热高度为 70 mm 时,温度均值最

高,为 145.5 °C,这是由于微波相互间发生衰减最小。由图 16(b)可知,天线间距一定时,离散系数随加热高度的增大总体呈减小趋势,即温度均匀性更好;加热高度一定时,随着天线间距的增大呈减小的趋势。总的来看,当天线间距为 70 mm×70 mm,加热高度为 60 mm 时,离散系数最小,此时温度均匀性最好。综合来看,当厚度为 250 mm 时,天线间距为 70 mm×70 mm,加热高度为 70 mm 的组合下整体加热效果最好。



(a) 整体温度均值



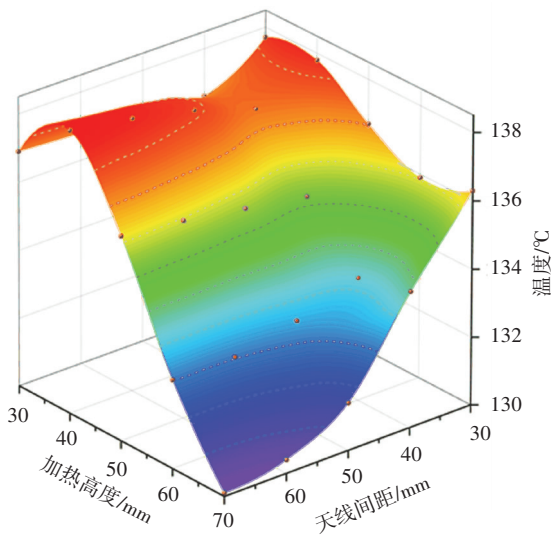
(b) 温度离散系数

图 16 沥青混合料厚度为 250 mm 时温度统计

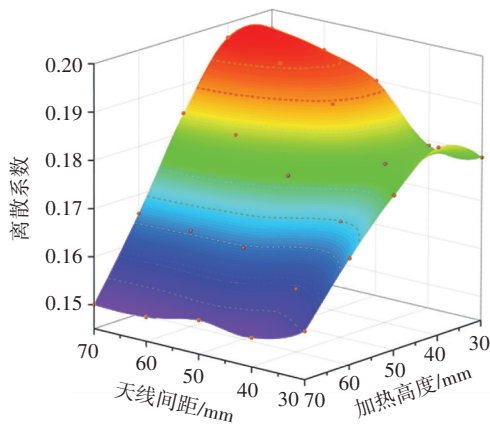
Fig.16 Temperature statistics when asphalt mixture thickness is 250 mm

3.2 混合料厚度为 350 mm 时仿真结果

混合料厚度为 350 mm 时,对 5 种天线间距和 5 种加热高度,共 25 组模型进行仿真,计算出各组温度均值、标准差及离散系数,结果如图 17 所示。



(a) 整体温度均值



(b) 温度离散系数

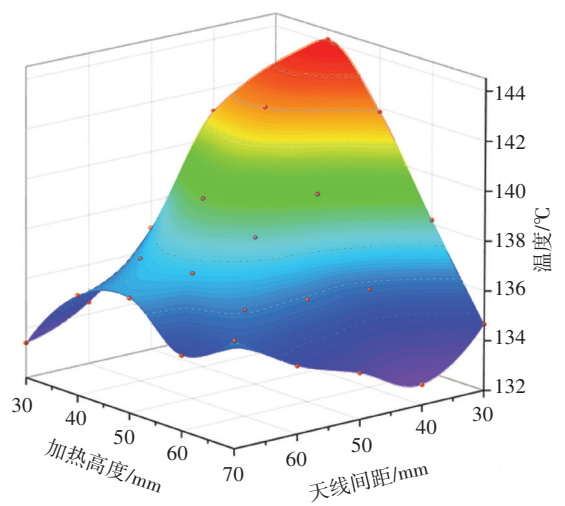
图 17 沥青混合料厚度为 350 mm 时温度统计

Fig.17 Temperature statistics when asphalt mixture thickness is 350 mm

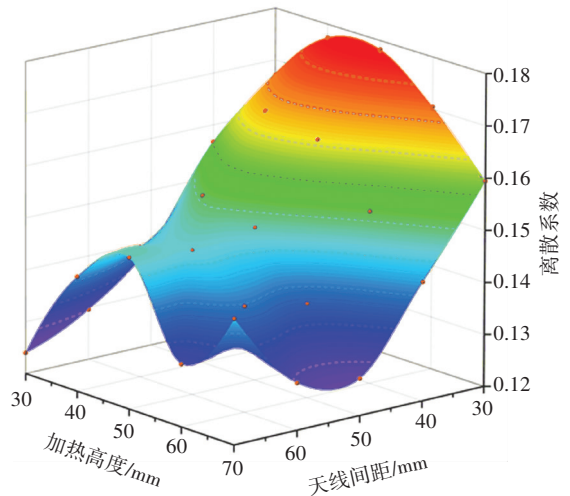
由图 17(a)可知,厚度为 350 mm 时,天线间距一定,混合料整体温度均值随加热高度的增大呈先上升后下降的趋势;不同天线间距下,当加热高度为 40 mm 时,混合料温度均值最高。总的来看,当加热间距为 70 mm×70 mm,加热高度为 40 mm 时,混合料温度均值最高,为 138.3 ℃。由图 17 中(b)可知,当天线间距一定时,离散系数随加热高度的增大呈逐渐减小的趋势,当加热高度为 70 mm 时,各组天线间距的离散系数均为最小,且相差不大,天线间距为 60 mm×60 mm、70 mm×70 mm 时,离散系数最小,此时温度均匀性最好。综合来看,当厚度为 350 mm 时,天线间距为 70 mm×70 mm,加热高度为 40 mm 的组合下加热效果最好。

3.3 混合料厚度为 450 mm 时仿真结果

混合料厚度为 450 mm 时,对 5 种天线间距和 5 种加热高度,共 25 组模型进行仿真,计算出各组温度均值、标准差及离散系数,结果如图 18 所示。



(a) 整体温度均值



(b) 温度离散系数

图 18 沥青混合料厚度为 450 mm 时温度统计

Fig.18 Temperature statistics when asphalt mixture thickness is 450 mm

由图 18(a)可知,沥青混合料厚度为 450 mm 时,天线间距一定,混合料整体温度随加热高度的增大呈先增大后减小的趋势。天线间距越小,温度均值随加热高度的变化波动就越大,天线间距越大,波动越小。天线间距为 70 mm×70 mm 时,温度均值波动最小,最大差距不到 3 ℃。总的来看,天线间距为 30 mm×30 mm,加热高度为 40 mm 时,混合料温度均值最高,为 144.1 ℃,由图 18(b)可知,当天线间距一定时,离散系数随着加热高度的增大呈先增大后减小的趋势;当加热高度一定时,离散系数随着天线间距的增大呈逐渐减小的趋势。总的来看,当天线间距为 70 mm×70 mm,加热高度为 30 mm 时,离散系数最小,此时温度均匀性最好。

综上所述,当沥青混合料厚度为 450 mm 时,天线间距为 30 mm×30 mm,加热高度为 40 mm 的组合下整体加热效果最好。

3.4 不同混合料厚度最佳对比

根据以上分析,发现不同厚度下加热效果不同,因为厚度改变时,加热腔体积同时变化,导致箱体内

微波相互干涉状态发生变化。现将这 3 组数据进行对比分析,得出并非排布下加热效果最好的组合,数据见表 3。

表 3 不同厚度下最佳组合温度统计

Tab.3 Temperature statistics for optimal combination under different thicknesses

混合料厚度/mm	天线间距	加热高度/mm	温度均值/℃	标准差	离散系数
250	70 mm×70 mm	70	145.5	12.98	0.089
350	70 mm×70 mm	40	138.3	27.18	0.197
450	30 mm×30 mm	40	144.1	25.57	0.177

由表 3 可知,厚度为 250 mm 时,混合料温度均值最高,达到了 145.5 ℃,同时离散系数最小,说明温度均匀性最好。

综上所述,当混合料厚度为 250 mm,天线间距为 70 mm×70 mm,加热高度为 70 mm 时,加热质量最好。此时沥青混合料温度云图如图 19 所示,可以看出,绝大多数沥青混合料温度处于 120~170 ℃之间,180 ℃以上几乎没有,说明沥青老化很少;从深度方向看,随着深度的增加,混合料温度变化很小,混合料无论是整体还是在深度方向上,温度均匀性均较好,说明微波能在混合料内分布较为均匀。

均匀性好,尤其在深度方向上,温度梯度小,可以减缓表面沥青老化,且 915 MHz 微波频率的磁控管可以实现大功率输出,有利于大型微波加热再生设备的研制。

2)以减小回波损耗为目标,对喇叭天线的端口大小以及磁控管与短路面的距离进行优化,优化后的天线加热沥青混合料回波损耗明显减小,说明有更多的微波能被沥青混合料吸收,加热效率更高。

3)以沥青混合料温度均值、离散系数为依据,对天线间距、加热高度以及混合料厚度等影响因素进行了研究,得出混合料厚度为 250 mm,天线间距为 70 mm×70 mm,加热高度为 70 mm 时加热效果最好,此时混合料整体温度均值最高,且离散系数最低,沥青老化现象很少。

参考文献

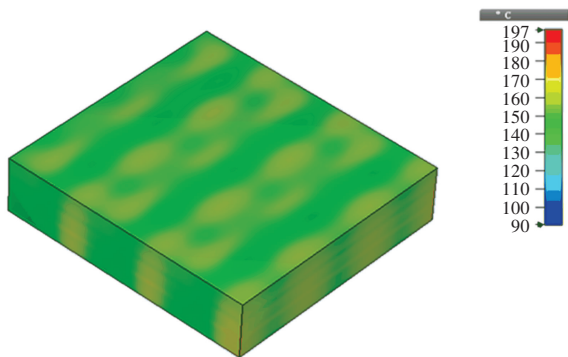
[1] MAKOWSKA M, AROMAA K, PELLINEN T. The rheological transformation of bitumen during the recycling of repetitively aged asphalt pavement[J]. Road Materials and Pavement Design, 2017, 18(2): 50. DOI: 10.1080/14680629.2017.1304266

[2] HAFEEZ I, OZER H, AL-QADI I L. Performance characterization of hot in-place recycled asphalt mixtures[J]. Journal of Transportation Engineering, 2014, 140(8): 1. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000679

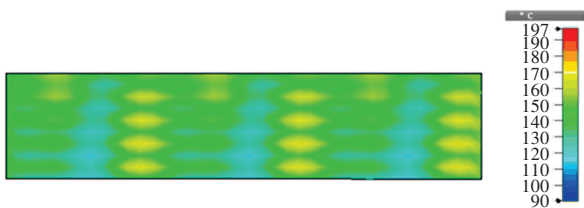
[3] 马登成. 沥青路面再生设备研究现状与发展[C]//中国公路学会养护与管理分会第十届学术年会论文集. 北京:中国公路学会养护与管理分会, 2020: 16
MA Dengcheng. Research status and development of asphalt pavement recycling equipment[C]// Proceedings of the 10th Annual Conference of Maintenance and Management Branch of China Highway Society. Beijing: Maintenance and Management Branch of China Highway & Transportation Society, 2020: 16. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2020.001578

[4] 郭小宏,李朋伟,欧阳结新,等. 沥青路面就地热再生加热机的加热方式对比[J]. 筑路机械与施工机械化, 2014, 31(2): 62
GUO Xiaohong, LI Pengwei, OUYANG Jiexin, et al. Comparison and analysis of heating methods of hot in-place recycling heating machine for asphalt pavement[J]. Road Construction Machinery and Construction Mechanization, 2014, 31(2): 62. DOI: 10.3969/j.issn.1000-033X.2014.02.011

[5] 曹红熊,张东省. 微波对沥青混合料的性能影响研究与分析[J]. 公路交通科技, 2014, 10(3): 27



(a) 混合料整体温度云图



(b) 深度方向温度云图

图 19 最优组合下沥青混合料温度云图

Fig. 19 Asphalt mixture temperature cloud map under optimal combination

4 结 论

1)根据喇叭天线设计原则设计了天线尺寸参数,对比了 915 MHz 和 2 450 MHz 两种频率下微波加热沥青混合料加热效果。915 MHz 微波频率加热

- CAO Hongxiong, ZHANG Dongsheng. Research and analysis of the influence of microwave on the performance of asphalt mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 10(3):27
- [6] EPRI Industrial Program. Microwave process for asphalt pavement recycling[R]. Los Angeles: EPRI Industrial-Environment & Energy Management, 1992
- [7] 焦生杰,任化杰. 沥青路面微波养护技术研究综述[J]. 筑路机械与施工机械化, 2020, 37(5):44
JIAO Shengjie, REN Huajie. Review of research on microwave heating technology for asphalt pavement maintenance [J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2020, 37(5):44
- [8] 王成蓉, 杨阳. 一种高效、高均匀性的微波加热策略[J]. 真空电子技术, 2019(5):62
WANG Chengrong, YANG Yang. An efficiency and uniform microwave heating strategy [J]. Vacuum Electronics, 2019(5):62. DOI: 10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2019.05.12
- [9] 薄元尧, 李昊, 赵勋旺, 等. 沥青路面微波加热器高效仿真分析[J]. 微波学报, 2016, 32(21):36
BO Yuanyao, LI Hao, ZHAO Xunwang, et al. Efficient simulation and analysis of microwave heating device for asphalt pavement [J]. Journal of Microwaves, 2016, 32(21):36
- [10] 张永健, 康爱红, 李波, 等. 微波加热改善再生沥青混合料路用性能[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2021, 42(1):76
ZHANG Yongjian, KANG Aihong, LI Bo, et al. Improving road performance of recycled asphalt mixture by microwave heating [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2021, 42(1):76. DOI: 10.15926/j.cnki.issn1672-6871.2021.01.012
- [11] NORAMBUENA-CONTRERAS J, GARCIA A. Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating [J]. Materials & Design, 2016, 106:404. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.05.095
- [12] 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, 27(1):31
LI Shanqiang, WANG Xuancang, WU Chuanhai. Research on road performance of asphalt mixtures based on microwave heating [J]. Technology of Highway and Transport, 2013, 27(1):31
- [13] NORAMBUENA-CONTRERAS J, GARCIA A. Crack-healing evaluation of fibre-reinforced asphalt mixtures using microwave and induction heating [J]. Road Materials and Pavement Design, 2019, 20(3):1
- [14] RADOMSKY J. Method and apparatus for treating asphaltic concrete paving materials: US4856202[P]. 1989-08-15
- [15] 朱松青, 史金飞, 刘海宽, 等. 微波加热湿旧沥青混合料的传热传质研究[J]. 中国公路学报, 2009, 22(1):120
ZHU Songqing, SHI Jinfei, LIU Haikuan, et al. Research on heat and mass transfer within moisture recycled asphalt mixtures subjected to microwave heating [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(1):120. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2009.01.020
- [16] ZHU Songqing, ZHANG Zhisheng, SHI Tailong. Electromagnetic simulation and experimental analysis of microwave heaters for asphalt pavements [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2011, 27(4):410. DOI: 10.3969/j.issn.1003-7985.2011.04.013
- [17] 高子渝, 焦生杰, 唐相伟. 频率对微波加热沥青混合料的影响 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2009, 29(6):32
GAO Ziyu, JIAO Shengjie, TANG Xiangwei. Influence of frequency on asphalt mixture's heating by microwave [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2009, 29(6):32. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2009.06.008
- [18] 边晓伟. 沥青路面微波热再生设备天线阵列排布及移动加热的影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2018
BIAN Xiaowei. Effect of antenna array arrangement and moving heating on microwave thermal regeneration equipment for asphalt pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018
- [19] 韩旭. 沥青路面微波加热新技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017
HAN Xu. Research on new technology of microwave heating of asphalt pavement [D]. Xi'an: Xidian University, 2017
- [20] 朱洪洲, 袁海, 刘玉峰, 等. SBS 改性沥青混合料宏观裂缝微波自愈合研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(8):84
ZHU Hongzhou, YUAN Hai, LIU Yufeng, et al. Microwave self-healing properties of macro-fracture in SBS modified asphalt mixture [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2020, 39(8):84. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2020.08.13
- [21] NORAMBUENA-CONTRERAS J, GONZALEZ-TORRE I. Influence of the microwave heating time on the self-healing properties of asphalt mixtures [J]. Applied Sciences, 2017, 7(10):1076. DOI: 10.3390/app7101076
- [22] KAVUSSI A, KARIMI M M, DEHAGHI E A. Effect of moisture and freeze-thaw damage on microwave healing of asphalt mixes [J]. Construction and Building Materials, 2020, 254(9):119268. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119268
- [23] GULISANO F, CRUCHO J, GALLEGO J, et al. Microwave healing performance of asphalt mixture containing electric arc furnace (EAF) slag and graphene nanoplatelets (GNPs) [J]. Applied Sciences, 2020, 10(4):1428. DOI: 10.3390/app10041428

(编辑 魏希柱)