

DOI:10.11918/202309046

# 微波-热风混合加热沥青路面回收料仿真分析

马登成, 刘壮壮, 刘双鹤

(公路养护装备国家工程研究中心(长安大学), 西安 710064)

**摘要:** 为提高沥青路面回收料(RAP)的加热质量和效率,降低微波加热装机功率,促进超大功率微波在热再生设备中的应用,提出了微波-热风混合加热方法。通过对微波、热风及微波-低温热风混合加热有限元分析,证明了微波-低温热风混合加热相比于单独加热更具有优势。分析了微波热风混合加热过程,对多馈口微波热风混合加热腔及天线进行设计,以此为基础构建了混合加热有限元模型。对不同加热高度、热风温度、热风风速等对混合加热效果的影响因素进行仿真分析,对比分析了RAP在微波加热、热风加热和微波热风混合加热的加热效果。结果表明:RAP加热高度会导致混合加热腔内微波发生干涉,对加热效果产生较大影响。风温过高会导致RAP表面迅速出现烤焦老化。加热距离为50、100 mm时,混合加热较微波单独加热,加热效率分别提高9.32%、11.75%;较热风单独加热,RAP上表面的加热效率分别提高了124.7%、92.9%,下表面的加热效率分别提高了38.8%、34.8%,同时均匀性都得到不同程度提高。说明微波热风混合加热能够明显提高RAP的加热效率,改善微波单独加热效率不高和均匀性差的问题,兼顾两者优点,保证了RAP的加热质量,为RAP的再生加热提供了新的方法。

**关键词:** 沥青路面回收料(RAP);微波-热风;混合加热;电磁场;温度场;数值模拟

中图分类号: U416.26;U418.6+7

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)12-0143-12

## Simulation analysis of microwave-low temperature hot air mixed heating for reclaimed asphalt pavement

MA Dengcheng, LIU Zhuangzhuang, LIU Shuanghe

(National Engineering Research Center of Highway Maintenance Equipment (Chang'an University), Xi'an 710064, China)

**Abstract:** To improve the heating quality and efficiency of reclaimed asphalt pavement (RAP), reduce the installed power of microwave heating, and promote the application of ultra-high power microwave in hot recycling equipment, a microwave-hot air mixed heating method was proposed. Finite element analysis of microwave, hot air and microwave-low temperature hot air mixed heating demonstrated the advantages of microwave-low temperature hot air mixed heating over separate heating. The microwave-hot air hybrid heating process was analyzed, the multi-feeder microwave-hot air mixed heating chamber and antenna were designed, and the mixed heating finite element model was constructed on this basis. Factors affecting the mixing heating effect were simulated and analyzed, such as different heating heights, hot air temperatures, and hot air velocities. The heating effects of RAP in microwave heating, hot air heating and microwave-hot air mixed heating were compared and analyzed. The results show that the heating height of RAP can cause microwave interference in the mixed heating chamber and significantly affect the heating effect. Excessively high air temperature can lead to rapid surface scorching and aging of RAP. At heating distance of 50 mm and 100 mm, hybrid heating outperforms microwave or hot air heating alone, with efficiency improvements of 9.32% and 11.75%, respectively, compared to microwave heating, and surface heating efficiency enhancements of 124.7% and 92.9%, and underside heating efficiency improvements of 38.8% and 34.8%, respectively, compared to hot air heating. Additionally, uniformity is improved to varying degrees. This indicates that microwave-hot air mixed heating can significantly improve the heating efficiency of RAP, addressing the problems of low heating efficiency and poor uniformity of microwave heating alone. By combining the strengths of both methods, this approach ensures the heating quality of RAP, and provides a new method for the regeneration heating of RAP.

**Keywords:** reclaimed asphalt pavement(RAP); microwave-low temperature hot air; mixed heating; electromagnetic field; temperature field; numerical simulation

收稿日期: 2023-09-18; 录用日期: 2023-10-30; 网络首发日期: 2024-09-19

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240919.0934.002>

基金项目: 陕西省自然科学基金面上项目(2024JC-YBMS-413)

作者简介: 马登成(1981—), 男, 副教授, 硕士生导师, 国际学生博士生导师

通信作者: 马登成, mdc8235@163.com

微波加热环境温度低,可避免沥青路面回收料(reclaimed asphalt pavement, RAP)加热时表面沥青的老化<sup>[1]</sup>,有助于促进新旧沥青的融合,改善再生沥青混合料的多项性能等<sup>[2-3]</sup>。同时,理想情况下,微波加热还可实现 100% RAP 再生加热回收,而传统加热方式的回收率只有 30% ~ 50%<sup>[4-5]</sup>。然而单独微波加热对微波总功率要求过高,且存在加热不均匀性,导致“热点”甚至“热失控”等不利现象出现,不仅影响加热质量而且影响加热效能<sup>[6]</sup>,这在超大功率微波加热谐振腔中表现的更加突出,成为制约超大功率微波热再生设备应用的主要原因之一。为此,众多学者做了大量的研究,如刘小明等<sup>[7]</sup>进行了多物理场下微波加热沥青混凝土传热性能研究。Wang 等<sup>[8]</sup>采用加入吸波掺料提高了 RAP 的微波加热效率。杨彪等<sup>[9-10]</sup>提出一种基于突变理论尖点模型的微波加热过程的热失控分析方法和基于动网格的微波加热温度均匀性数值计算方法。郑先哲等<sup>[11]</sup>采用间歇变功率微波加热工艺改善均匀性。张春等<sup>[12]</sup>通过金属壁移动提高微波加热均匀性等。在微波与热风联合加热方面,Bundit 等<sup>[13]</sup>开展了热风微波连续带式干燥机的设计及性能评价。王童等<sup>[14]</sup>对比了热风、微波、微波热风联合干燥对花生含水率的影响,探讨了热风-微波串联干燥的最佳工艺参数。徐艳阳等<sup>[15]</sup>发现热风与微波接力加热比单独热风加热总能耗显著降低。上述联合加热其实都属于串连接力式,只是简单的先后加热,未能发挥两种加热方式的混合作用。实际上微波与热风的传热、传质机理都不同,热风加热传质过程是水分蒸发由表及里,而微波则是由里及表,从促进传质角度来看,将微波与热风混合起来加热,可以实现 RAP 中液态水和气态水同时从其内部和表面扩散,类似于“泵”出效应,有利于提高除湿效果。同样,热风传热过程也是由表及里,而微波加热则是由里及表,采用混合加热能够实现 RAP 内外同时加热。若加热过程中采用低温热风则既提高了加热效率,又不会造成沥青老化,还有助于降低微波的加热功率,能够提高整体的加热效率,实现 1 + 1 > 2 的加热效果。基于此,本文提出了 RAP 微波热风混合加热方法,实际上农产品采用这种混合加热已获得很多成功应用<sup>[16-18]</sup>,但是在微波热风混合加热 RAP 方面,尽管 Jeppson 等<sup>[19]</sup>已证明通过利用微波能量与热发动机废气相结合的方法对沥青路面进行加热在技术上和

经济上都是可行的,但是系统地对微波热风混合加热 RAP 的加热过程及加热效果影响规律进行分析至今未见报道。因此,有必要进一步验证微波热风混合加热应用于 RAP 再生加热的可行性,分析混合加热 RAP 的加热过程及加热效果的影响规律,寻求提高 RAP 加热效率和加热均匀性的方法,为微波热风混合加热在沥青路面超大功率微波热风再生加热设备的研究与应用提供理论依据。

## 1 微波热风混合加热过程分析

微波热风混合加热结合了微波与热风各自加热特点,混合加热时 RAP 内部同时存在着质、热传递过程。

从 RAP 加热过程来看(从常温加热至 105 °C 水分溢出),微波加热与热风加热的传热传质过程有很大区别(见图 1)。热风加热传热和传质方向相反:传热由 RAP 表面向内部传递,即由外而内加热,温度梯度是传热的主要推动力,但外部温度不宜过高,过高的温度易造成 RAP 中的沥青老化;传质是水分在 RAP 表面蒸发,使内部含水量大于表面,推动力是 RAP 内外含水量之差。而微波加热传热和传质方向相同:传热热量在 RAP 中各粒料的内部产生并向其外部传递;传质是在其内部水分形成大量的水蒸气,形成的压力梯度推动传质过程持续。如果 RAP 的初始含水量高,则其内部水蒸气形成的压力上升速度就快,液态的水分也可以在压力梯度作用下从 RAP 内部排出来,形成一种“泵出”作用,这样 RAP 中的液态水和气态水同时从其内部向表面扩散,因此加热速率快。

混合加热则是将热风场和微波场同时作用于 RAP,热风在加热其表面形成热传导的同时能有效地排除 RAP 表面及浅层缝隙中的水分;微波加热独特的“泵出”效应能快速排出内部水分并具有内加热的特性,两者混合可充分发挥各自的优势,实现内外同时快速加热与除湿。水蒸气溢出前,这种混合加热非常有效;水蒸气溢出后,重新调整微波与热风混合的匹配参数实现持续快速低温加热,在提高 RAP 的加热速度与节能的同时避免沥青老化。由此可见,微波热风混合加热有如下优势:1) 可实现 RAP 内外同时加热、避免沥青老化,提高加热效率。2) RAP 在铣刨回收时含水量增加,热风高温环境有利于加大微波除湿能力。3) 合理匹配两者比例,可加快加热速度,提高加热质量,降低加热成本。

4)能充分发挥各自的工艺优势,如热风的处理量大,加热成本低;微波场中热、质传递快等。因此,理

论上微波热风混合加热是实现 RAP 多次循环再生利用,解决 RAP 再生利用的有效途径。

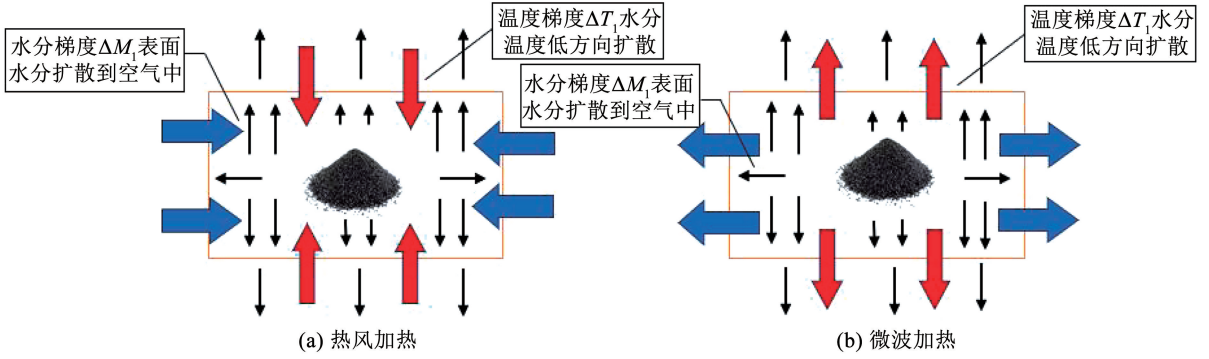


图 1 热风加热与微波加热传热传质对比

Fig. 1 Comparison of heat and mass transfer between hot air heating and microwave heating

## 2 微波热风混合加热谐振腔及波导设计

### 2.1 微波热风混合加热谐振腔设计

微波加热相比于热风加热,介质材料温度变化及分布非常复杂,各种复杂的因素会使被加热介质受热不均或发生“热失控”,降低微波能利用率<sup>[20]</sup>,因此,主要以微波加热的特点为依据进行微波热风混合加热谐振腔的设计。确定腔体最佳尺寸应具有以下几个要素<sup>[21]</sup>:1)谐振模式总数多,模式数越多,加热均匀性越好。2)根据谐振腔微扰理论,腔体的细微变化会对模式数产生巨大影响,因此应选择模式数量对尺寸变化不敏感的谐振腔尺寸。3)模式标号奇偶比越接近,电磁场分布越均匀。4)固有品质因数越大,单位周期的损耗功率越小。

#### 2.1.1 谐振频率

多模谐振腔温度的均匀性和电磁场的均匀性一致。谐振模式数与电磁场的均匀性相关,谐振模式数越多,各模式在腔内相互作用的可能性越大,均匀性就越好。各模式谐振频率由下式确定:

$$f - \Delta f \leq \frac{c}{2} \left[ \left( \frac{m}{a} \right)^2 + \left( \frac{n}{b} \right)^2 + \left( \frac{p}{d} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \leq f + \Delta f \quad (1)$$

式中: $f$ 为中心频率, $\Delta f$ 为振荡频率, $c$ 为光速, $a$ 、 $b$ 、 $d$ 分别为谐振腔长、宽、高, $m$ 、 $n$ 、 $p$ 分别为谐振腔模式系数。

#### 2.1.2 固有品质因数

品质因数表征谐振腔频率选择能力的大小及选择灵敏度的大小,由下式确定:

$$Q_0 = 2\pi \frac{W}{W_T} = \omega_0 \frac{W}{P_1} \quad (2)$$

式中: $Q_0$ 为固有品质因数, $W$ 为谐振腔储能, $W_T$ 为 1 个

周期能量损耗, $P_1$ 为腔内损耗功率, $\omega_0$ 为谐振角频率。

微波由电场和磁场组成,所以谐振腔储能由电场储能和磁场储能确定为

$$W = W_e + W_m = \frac{1}{2} \int_V \epsilon |\vec{E}|^2 dV + \frac{1}{2} \int_V \mu |\vec{H}|^2 dV \quad (3)$$

式中: $W$ 为谐振腔储能, $W_e$ 为电场储能, $W_m$ 为磁场储能, $\epsilon$ 为介电常数, $\mu$ 为磁导率, $\vec{E}$ 为电场强度, $\vec{H}$ 为磁场强度。

腔壁上流过的高频电流引起的腔内损耗功率为

$$P_1 = \frac{1}{2} \oint_S |\vec{J}_s|^2 R_s dS = \frac{1}{2} R_s \oint_S |\vec{H}_{tan}|^2 dS \quad (4)$$

式中: $\vec{H}_{tan}$ 为磁场切向分量, $\vec{J}_s$ 为面磁化电流密度, $\vec{J}_s = \mathbf{n} \times \vec{H}_{tan}$ ,其中 $\mathbf{n}$ 为法向矢量; $R_s$ 为表面阻抗。

联立式(2)~(4)可解得固有品质因数的具体计算式为

$$Q_0 = \frac{\omega_0 \mu \int_V |\vec{H}|^2 dV}{R_s \oint_S |\vec{H}_{tan}|^2 dS} = \frac{2}{\delta} \frac{\int_V |\vec{H}|^2 dV}{\oint_S |\vec{H}_{tan}|^2 dS} \quad (5)$$

式中 $\delta$ 为谐振腔内壁的趋肤深度。

由于谐振腔内壁附近切向磁场大于内部磁场,认为: $|\vec{H}|^2 \approx |\vec{H}_{tan}|^2/2$ ,可得关系式:

$$Q_0 \approx \frac{1}{\delta} \frac{V}{S} \quad (6)$$

式中: $V$ 为谐振腔体积, $S$ 为谐振腔内壁表面积。

借助 MATLAB 将问题转化为不等式问题进行求解。将若干组腔体尺寸带入式(1),中心频率选为 915 MHz,振荡频率为 25 MHz。并利用 Excel 处理得到谐振模式数、平均谐振频率、固有品质因数、体积与表面积之比,见表 1。

表 1 不同组合谐振腔

Tab. 1 Different combinations of resonant cavities

$a \times b \times c/\text{cm}$	体积与表面积比	品质因数	平均谐振频率/MHz	总模式数/个
235 × 270 × 1 100	0.564	6 878	915.248	2 719
235 × 290 × 1 100	0.581	7 085	915.470	2 925
235 × 310 × 1 100	0.596	7 268	915.503	3 138
285 × 290 × 900	0.623	7 598	915.375	2 873
285 × 310 × 900	0.634	7 732	915.269	3 274
285 × 330 × 900	0.654	7 976	915.471	3 458
335 × 280 × 800	0.651	7 939	915.389	2 865
335 × 300 × 800	0.661	8 061	915.579	3 062
<b>335 × 320 × 800</b>	<b>0.679</b>	<b>8 280</b>	<b>915.159</b>	<b>3 281</b>

根据选择原则,谐振腔尺寸为 335 cm × 320 cm × 800 cm 时,谐振模式数仅次于 285 cm × 330 cm × 900 cm 的谐振腔,但平均谐振模式最接近 915 MHz,

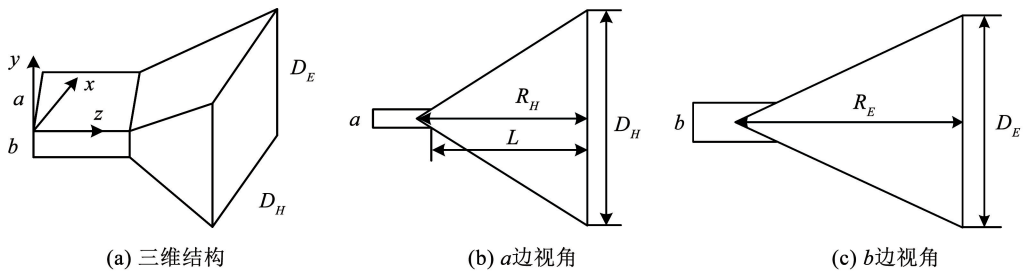


图 2 角锥喇叭天线结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pyramid horn antenna structure

矩形波导中的电磁波只沿着波导长度方向传播,波导内只存在 TE 波和 TM 波,波导传输一般为 TE<sub>10</sub> 模传输,因此,矩形波导截面尺寸  $a \times b$  在设计时,应遵循以下原则:1) 单模状态工作,频带尽可能宽;2) 能量损耗尽可能小;3) 击穿功率尽可能大。综合上述 3 方面因素, $a, b$  可选为:

$$0.7\lambda < a < \lambda, b < 0.5\lambda \quad (7)$$

本文选用的磁控管频率为 915 MHz,波长  $\lambda$  为 328 mm。将波长  $\lambda$  带入式(7),最终确定波导截面尺寸为 240 mm × 120 mm。喇叭口径尺寸  $D_H \times D_E$  在设计时,以回波损耗 S11 值为判断标准。回波损耗越小,表明 RAP 可吸收更多的微波能量,能量利用率就越高<sup>[21]</sup>。

COMSOL Multiphysics 在多物理场耦合方面有着巨大优势,利用其建立单天线加热模型,其中  $L$  确定为 100 mm,  $D_H$  尺寸分别为 350、360、370、380 mm,  $D_E$  尺寸分别为 220、230、240、250 mm,天线端口置于 RAP 上方,馈口输入功率设为 10 kW, RAP 体积大、厚度厚,结构设置为 400 mm × 350 mm × 300 mm,加

热时间为 10 min,进行仿真分析,查看不同端口加热回波损耗,结果见图 3。

## 2.2 波导天线设计

目前,沥青路面加热所用天线主要为角锥喇叭天线,与矩形天线相比主要有以下优点:

1) 相比于矩形天线,角锥喇叭天线是矩形天线宽边和窄边按一定张角张开形成的,增加了端面面积和加热面积。

2) 使加热更加均匀,提高了天线辐射效率。

3) 频率特性稳定,阻抗变化缓慢。

结合上述优点,并考虑微波加热装置为分体式加热以及 RAP 加热速度、加热效果等因素,本文选择角锥喇叭天线为天线模型,结构示意图见图 2。图 2 中  $a \times b$  为矩形波导截面尺寸,  $L$  为喇叭口径与波导之间的距离,  $D_H \times D_E$  为喇叭口径尺寸,  $R_H$  为  $H$  面内喇叭长度,  $R_E$  为  $E$  面内喇叭长度。

热时间为 10 min,进行仿真分析,查看不同端口加热回波损耗,结果见图 3。

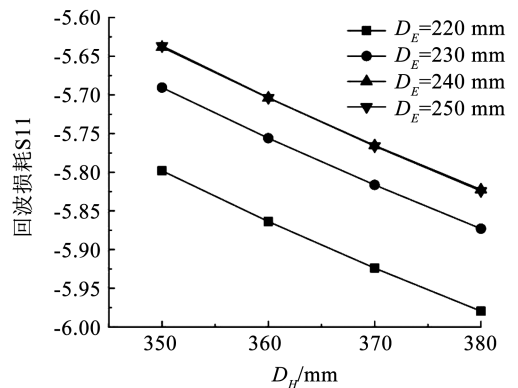


图 3 不同端口大小对应 S11 值

Fig. 3 Corresponding S11 values for different port sizes

由图 3 可知,  $D_E$  尺寸一定时, S11 值随  $D_H$  尺寸增大而减小,所以,  $D_H$  尺寸越大越好。  $D_H$  尺寸一定时, S11 值随  $D_E$  的尺寸增大而增大,所以  $D_E$  的尺寸越小越好,因此确定角锥喇叭天线的口径尺寸为 380 mm × 220 mm,其温度分布云图见图 4。

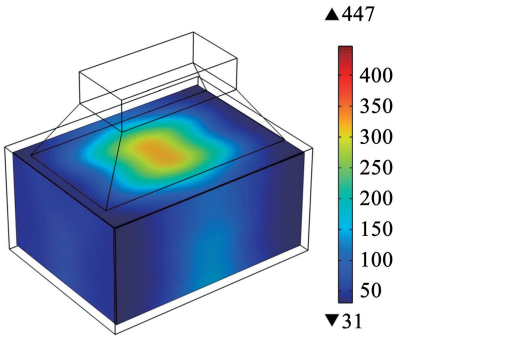


图 4 单馈口天线 (380 mm × 220 mm) 温度分布云图

Fig. 4 Temperature distribution cloud map of single breach antenna (380 mm × 220 mm)

从图 4 中发现单天线加热时天线覆盖中间区域内加热集中,但是周边区域加热不明显,易出现“热点”甚至“热失控”等不利现象。局部温度过高会造成 RAP 出现老化、焦化现象,在实际生产过程中不仅影响加热质量而且影响加热效能,不利于 RAP 的再生利用。因此对于超大功率微波再生加热设备须采用多源微波加热。

### 3 微波-低温热风混合加热建模

#### 3.1 混合加热控制方程

微波-低温热风混合加热涉及的电磁场、热场、流场在 Comsol Multiphysics 中具有不同的控制方程。

##### 3.1.1 电磁场控制方程

微波的本质是随时间不断变化的电场和磁场,可用 Maxwell 方程组表示,描述了电磁波在介质中传播的基本特性,由下式表示:

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{D} = \rho \\ \nabla \times \vec{B} = 0 \\ \nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} = \partial \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\vec{D}$  为电通量密度,  $C/m^2$ ;  $\rho$  为电荷体密度,  $C/m^3$ ;  $\vec{B}$  为磁感应强度,  $Wb/m^2$ 。

波动方程可由 Maxwell 方程推导得出,可以求解出微波加热场内任意点的电场和磁场强度分别为:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (9)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (10)$$

式中  $\sigma$  为电导率,  $S/m$ 。

电磁波通过 RAP 时会使其内部极性分子以非常高的频率摆动,分子间发生剧烈碰撞,产生能量损耗,损耗的电磁能转换成热能。电磁能与热能之间转换的能量与介电损耗因子和电场强度的平方成正比关系,即

$$Q_m = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2 \quad (11)$$

式中:  $Q_m$  为微波耗损能量,  $W/m^2$ ;  $f$  为微波频率 GHz;  $\varepsilon_0$  为真空介电常数,  $F/m$ ;  $\varepsilon''$  为相对介电常数损耗因子。

##### 3.1.2 热场控制方程

在微波热风混合加热 RAP 过程中,热传导是非稳态过程,本文采用瞬态控制,根据傅里叶热传导模型以及能量守恒方程建立传热方程为:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \nabla \cdot t + \nabla \cdot q = Q \quad (12)$$

$$q = -\kappa \nabla T \quad (13)$$

式中:  $\rho$  为沥青混合料密度,  $kg/m^3$ ;  $c_p$  为比定压热容,  $J/(kg \cdot K)$ ;  $t$  为加热时间,  $s$ ;  $\kappa$  为导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $\nabla T$  为温差,  $^{\circ}C$ ;  $q$  为热流密度,  $W/m^2$ ;  $u$  为速度,  $m/s$ 。

##### 3.1.3 流场控制方程

在热风加热中,热风流动加热遵循以下控制方程:

$$\rho(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \nabla \cdot [-p \vec{I} + \vec{K}] + \vec{F} \quad (14)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (15)$$

式中:  $\rho$  为湍流密度,  $g/m^3$ ;  $\vec{u}$  为微元体速度,  $m/s$ ;  $\vec{F}$  为微元体体力分量,  $N$ ;  $p$  为微元体压力,  $N$ ;  $\vec{I}$  为单位张量;  $\vec{K}$  为体应力张量,  $\vec{K} = (\mu + \mu_T)(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T)$ 。

#### 3.2 模型建立与参数设置

热风进风口和出风口左右对称排布,谐振腔顶部和侧面均布置天线,天线交错排布,间距为  $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ ,见图 5。

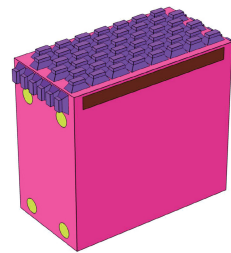


图 5 微波热风混合加热模型

Fig. 5 Microwave-hot air hybrid heating model

对于整个模型, RAP 采用六面体作为划分单元进行网格划分,其余采用自由四面体作为划分单元进行网格划分。共有 746 994 个域单元,平均单元质量为 0.761 1,满足计算精度要求,见图 6。

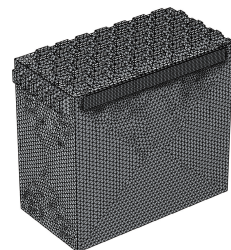


图 6 微波热风混合加热模型网格划分

Fig. 6 Grid division of microwave-hot air hybrid heating model

模型几何参数和部分材料参数分别见表 2、3。微波加热距离(顶部天线馈口至 RAP 的距离)分别为 50、100 mm, RAP 铺层厚度为 250 mm。天线排布方式为交错排布, 天线间距为 30 mm × 30 mm, 天线输入总功率为 225 kW, 每个馈口的功率设置为 3 947.4 W, 热风温度分别为 220、320、420 °C, 风速分别为 12、15、18 m/s, 进行两两正交实验。

表 2 模型几何参数

Tab.2 Model geometric parameters				cm
模型部件	长度	宽度	高度	半径
混合加热腔	175	335	320	
热风风口				15
RAP 料	175	300	250	
波导	24	12	6	
喇叭口	38	22	10	

表 3 RAP 材料参数

Tab.3 RAP material parameters

材料属性	相对磁导率	导热系数/(W·(m·K) <sup>-1</sup> )	密度/(kg·m <sup>-2</sup> )
属性数值	1	3.325	1 800
材料属性	比定压热容/(J·(kg·K) <sup>-1</sup> )	耗散因子	相对介电常数
属性数值	950	0.034	8.5

## 4 混合加热仿真分析

### 4.1 混合加热均匀性影响因素分析

采用整体温度均值评价 RAP 加热效率, 温度变异系数和最高温度值评价 RAP 加热均匀性, 图 7、8 分别为微波加热距离 50、100 mm, 加热 30 min 时的混合加热温度分布云图。

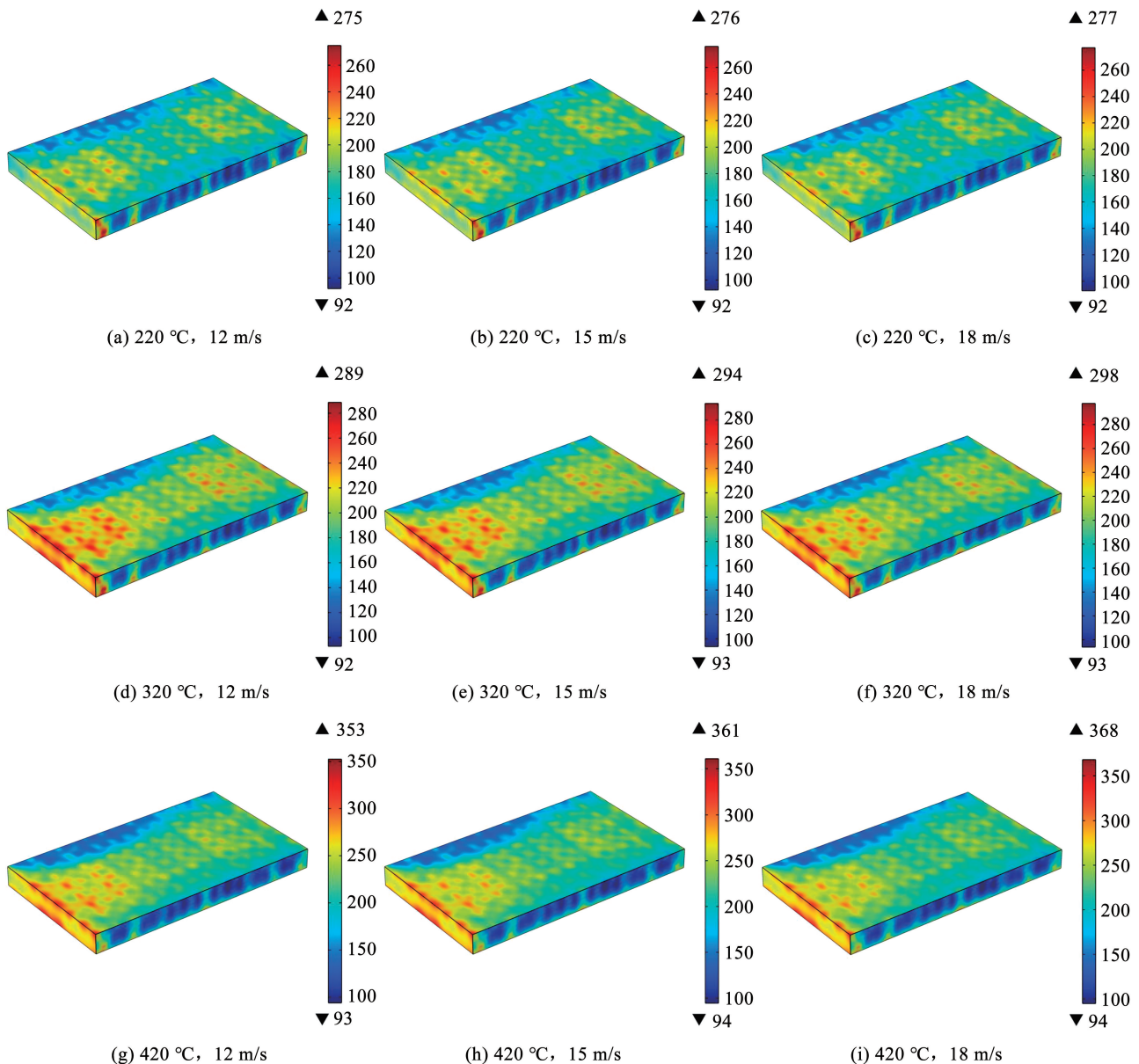


图 7 加热距离 50 mm、加热 30 min 时混合加热温度分布云图

Fig.7 Temperature distribution cloud map of hybrid heating at 50 mm heating distance and 30 minutes heating

如图 7 可知,风温对混合加热最高温度的影响明显大于风速,随着风温的增大 RAP 内外温差会迅速增大,导致表面温度快速上升,不利于 RAP 的再生利用。在加热距离为 50 mm,热风温度为 220 °C 时(图 7(a)、(b)、(c)),随着风速的增加对 RAP 最高温度影响并不显著。加热温度为 320 °C 时

(图 7(d)、(e)、(f)),风速每增加 3 m/s, RAP 最高温度增加 4~5 °C。加热温度为 420 °C 时(图 7(g)、(h)、(i)),风速每增加 3 m/s, RAP 最高温度增加 7~8 °C。这表明风温越高,风速对 RAP 的影响也在增大,风温是影响混合加热的主要因素,这也与实际相符。

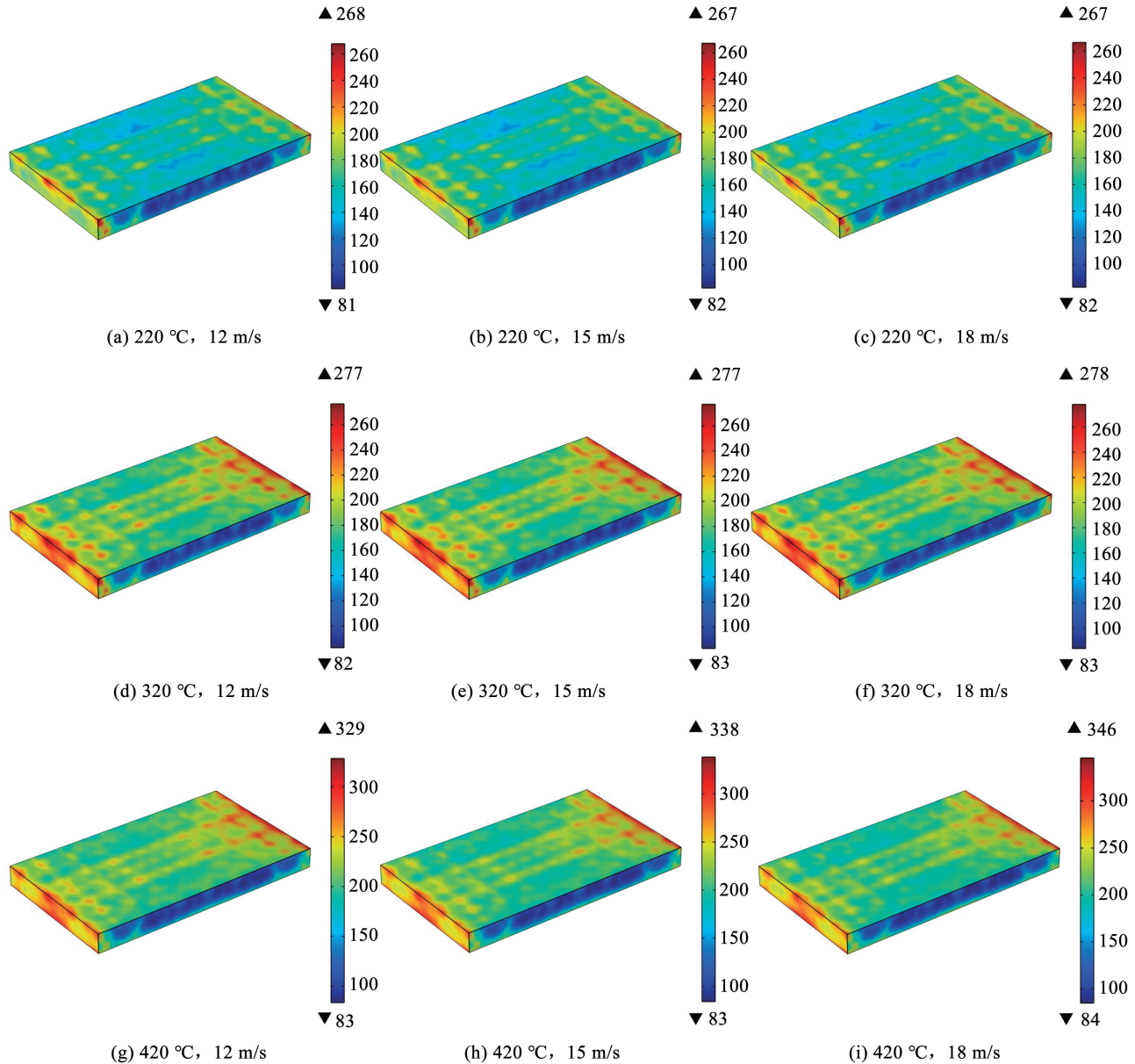


图 8 加热距离 100 mm,加热 30 min 时混合加热温度分布云图

Fig. 8 Temperature distribution cloud map of hybrid heating at 100 mm heating distance and 30 minutes heating

对比图 7、8,在同样风速与风温时,加热距离为 100 mm 的 RAP 最高温度降低,同时温度分布更均匀,说明微波加热距离对加热温度有影响,此外说明随着加热距离的增大,RAP 上表面与热风的接触空间增大,更容易实现热交换,从而使温度分布更为均匀。在风温为 220、320 °C 时,风速对 RAP 最高温度并无显著影响,风温为 420 °C 时,风速每增加 3 m/s,

RAP 最高温度增加 10~11 °C,说明随着加热距离的增大,风速对混合加热最高温度的影响减弱,需要更高的风温,风速才能对加热产生影响。

为更直观的分析混合加热 RAP 的影响因素,提取上述加热距离 50、100 mm 工况下的 Comsol Multiphysics 仿真数据,导入 Excel 分析得出每种工况下的温度平均值和温度变异系数,见图 9、10。

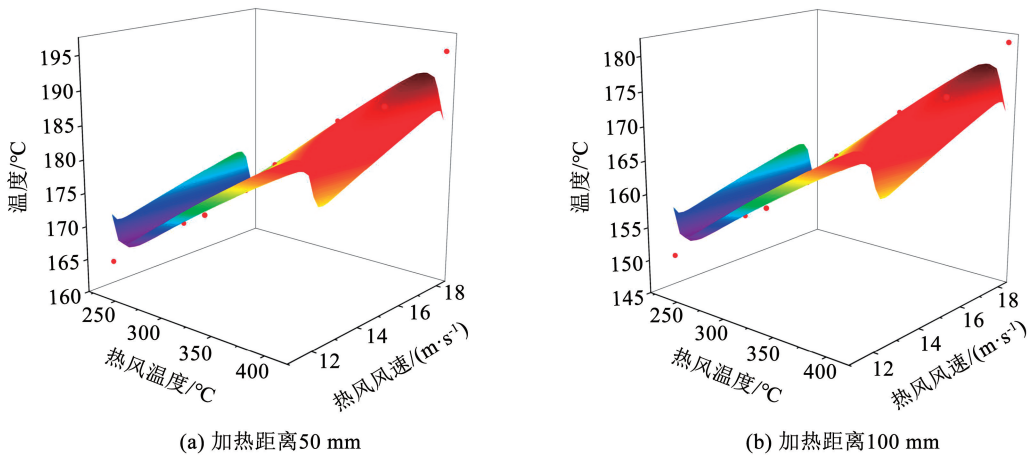


图 9 不同工况下 RAP 的温度均值

Fig. 9 Average temperature of RAP under different operating conditions

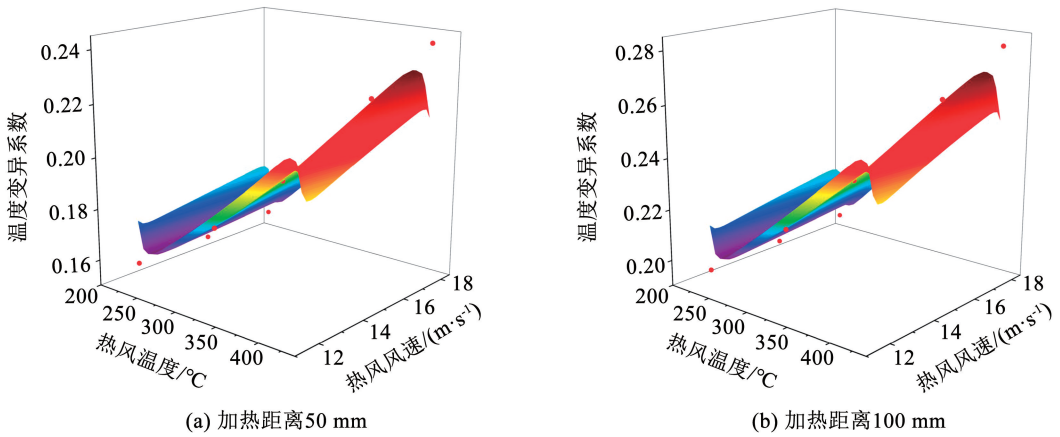


图 10 不同工况下 RAP 的温度变异系数

Fig. 10 Temperature coefficient of variation of RAP under different operating conditions

由图 9 可知,热风温度一定时,RAP 温度均值随着风速的增大呈上升趋势,平均风速每增加 3 m/s,RAP 温度均值增加 3 ~ 5 °C。热风风速一定时,RAP 温度均值随着风温的增大呈上升趋势,平均风温每增加 100 °C,RAP 温度均值增加 10 ~ 15 °C。在相同工况下,图 9(a)相比于图 9(b)中 RAP 温度均值会增加 12 ~ 18 °C,说明加热距离越近越有利于 RAP 加热。综合来看,风温和加热距离对混合加热效果影响较大,但较高的风温会导致 RAP 表面温度迅速升高,造成老化,因此实际应用中应采用低温热风。

由图 10 可知,热风温度一定时,RAP 的温度变异系数随着风速的增大呈上升趋势,平均风速每增加 3 m/s,RAP 温度变异系数值增加 0.02 ~ 0.05。热风风速一定时,RAP 温度变异系数随着风温的增大呈上升趋势,平均风温每增加 100 °C,RAP 温度变异系数值增加 0.03 ~ 0.06。在相同工况下,图 10(a)相比于图 10(b)中 RAP 温度变异系数会降低 0.03 ~ 0.07,这是由于加热距离增大造成侧面馈口与顶部

馈口的干涉作用加强,进而影响 RAP 内部加热,使 100 mm 工况的整体温度低于 50 mm 工况;另外较大的加热距离 RAP 表面与热风更充分接触,有利于热交换,使 RAP 表面温度更为均匀,但是整体提高的表面温度会进一步增大 RAP 内部和外表面的温度差,使其均匀性下降。综合来看,随着风温升高,风速增大,加热距离增大,RAP 均匀性都会降低,进一步说明微波 - 低温热风混合加热更有利于提高 RAP 的加热效果。

#### 4.2 单独加热与混合加热对比分析

为验证混合加热 RAP 新方法较单独加热具有更高的加热效率与加热均匀性,更适用于 RAP 加热,分别进行微波单独加热、热风单独加热与微波热风混合加热对比分析。

##### 4.2.1 微波单独加热与混合加热对比分析

微波加热参数相同,热风风温为 220 °C、风速为 15 m/s,对微波单独加热与混合加热进行对比仿真分析,结果见图 11、12。

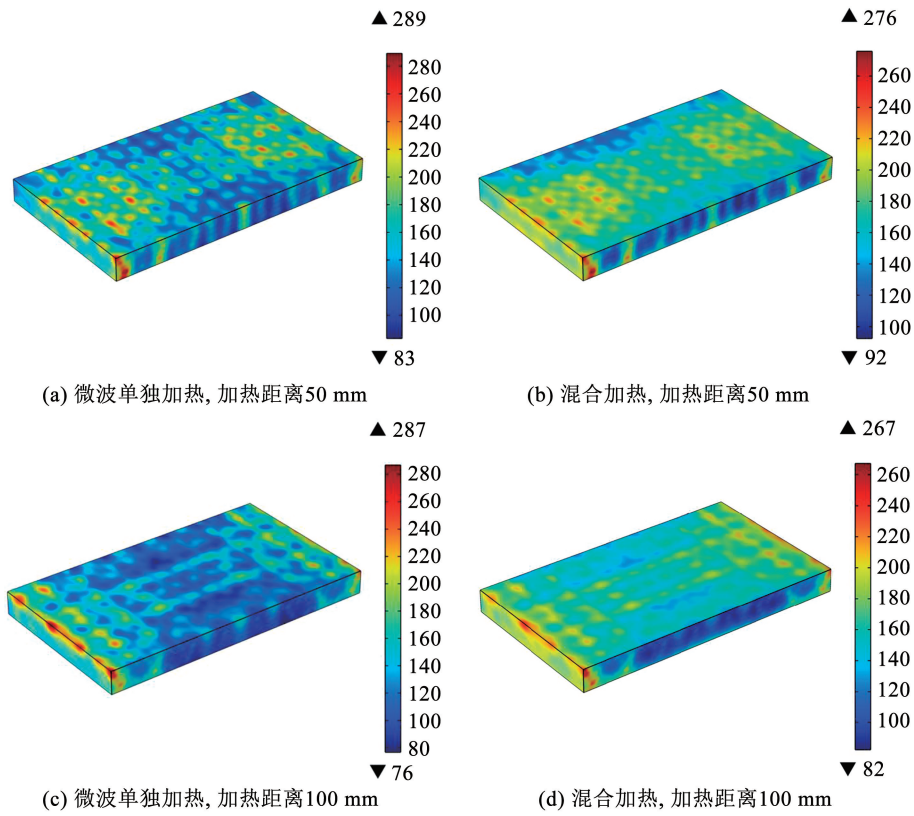


图 11 不同加热距离下,RAP 加热 30 min 温度分布云图

Fig. 11 Temperature distribution cloud diagram of RAP material heated for 30 minutes at different heating distances

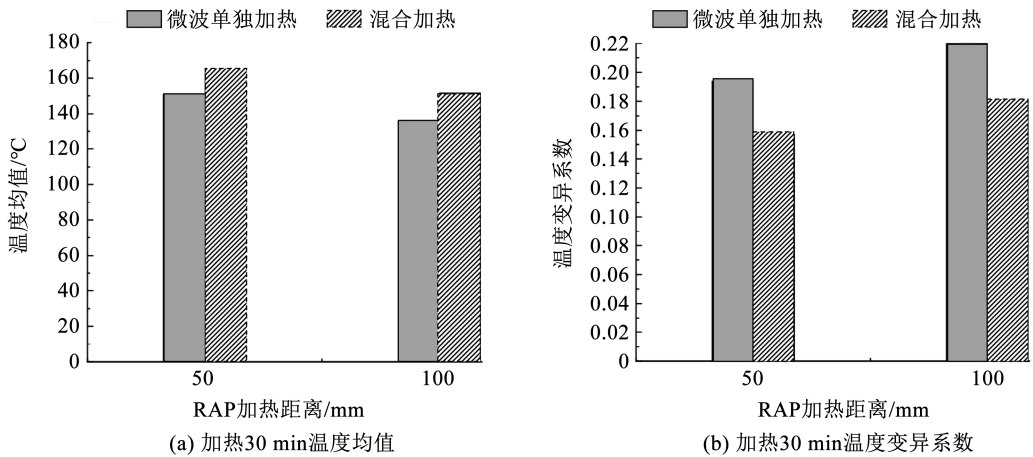


图 12 不同加热距离下,RAP 微波单独加热与混合加热对比

Fig. 12 Comparison of RAP microwave heating alone and hybrid heating at different heating distances

由图 11 可知,在微波加热过程中,微波在加热腔内会发生干涉,微波单独加热会出现“聚焦”的现象,使部分 RAP 温度过高,导致加热均匀性降低。图 11(b)、(d)的温度分布均匀性要高于图 11(a)、(c),这是因为在混合加热时,热风迅速充满整个腔体,可快速均匀对 RAP 由外向内加热,提高 RAP 表面及浅层温度分布的均匀性。对于微波单独加热,相比于图 11(a)、(c)在 RAP 两侧边缘产生更多的温度集中,“热点”现象更为明显。这是因为随着 RAP 加

热距离增大,混合加热腔两侧馈口与顶部馈口发射的微波产生的干涉更强烈。

从图 12 可知,混合加热整体温度均值与均匀性都高于微波单独加热。混合加热相比于微波单独加热,在加热距离为 50 mm 时,温度均值提高 14.07 °C,计算得出加热效率提高 9.32%,温度变异系数降低 0.037。在加热距离为 100 mm 时,温度均值提高 15.97 °C,计算得出加热效率提高 11.75%,温度变异系数降低 0.028。加热距离为 100 mm 加热效率

的提高要大于加热距离为 50 mm,这是因为加热距离的增大会使 RAP 表面受热更加充分。表面受热充分的同时会增大内外温差,这也造成了加热距离为 50 mm 温度变异系数的降低要大于加热距离为 100 mm。综合可知,混合加热对 RAP 加热效率和加热均匀性都有所提高,为保证较好的均匀性,混合加热时热风应采用低温高风速。

#### 4.2.2 热风单独加热与混合加热对比分析

因为 RAP 导热系数较低,热风加热方式为由外向内加热,加热深度较浅,所以选择 RAP 上、下表面的加热情况进行分析。保证其他边界条件不变,选择风温为 220 °C、风速为 15 m/s 工况下的热风加热与混合加热 RAP 进行对比分析,加热结果分别见图 13、14。结果对比分析见图 15。

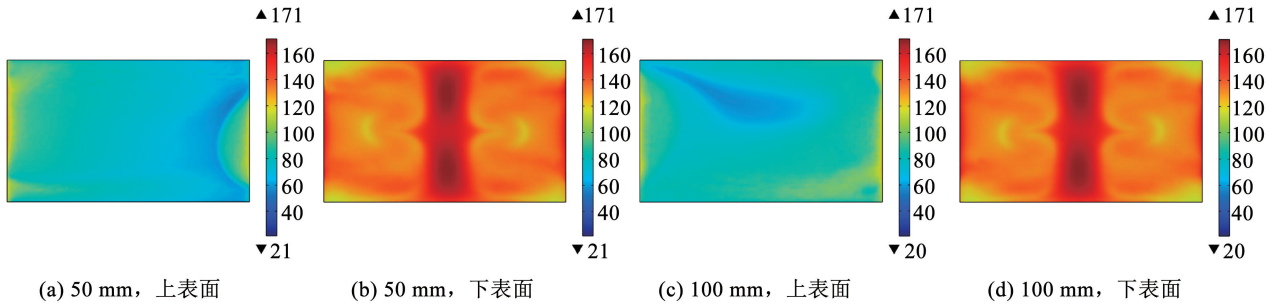


图 13 不同加热距离下,RAP 热风单独加热温度分布云图

Fig. 13 Cloud chart of temperature distribution for RAP hot air heating at different heating distances

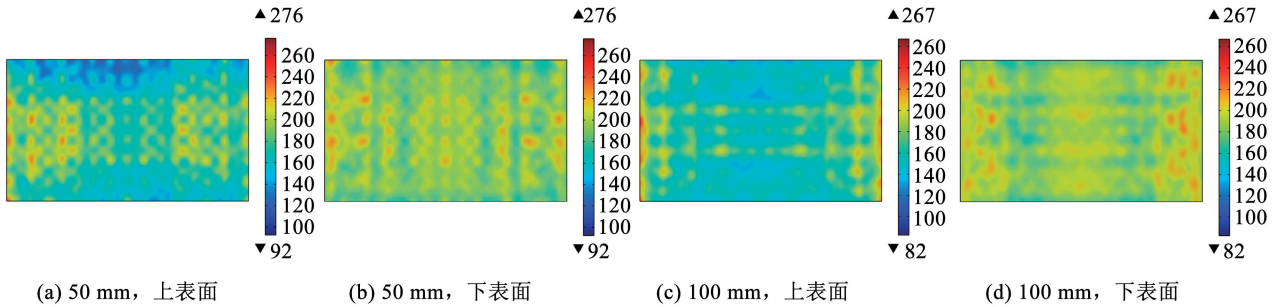


图 14 不同加热距离下,RAP 混合加热温度分布云图

Fig. 14 Cloud chart of RAP mixed heating temperature distribution at different heating distances

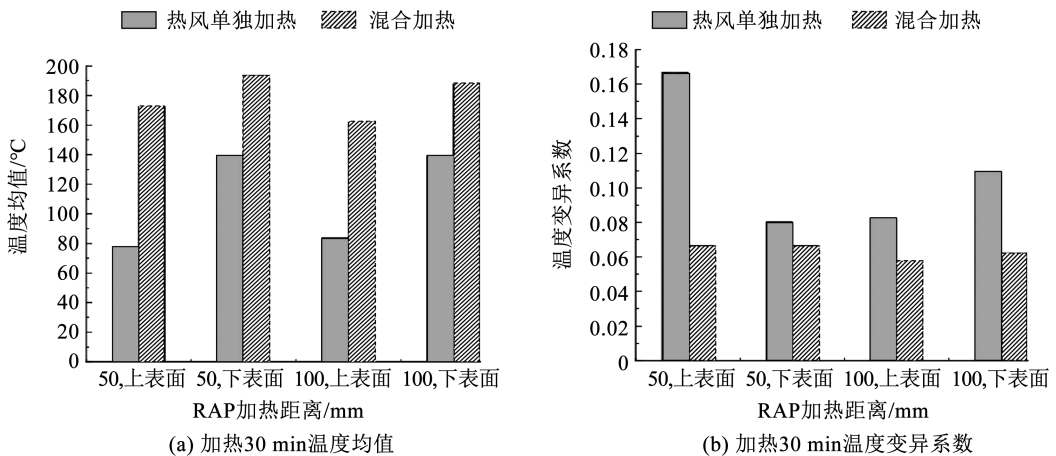


图 15 不同加热距离下,RAP 热风单独加热与混合加热对比

Fig. 15 Comparison of separate heating and mixed heating of RAP at different heating distances

由图 13 可知,热风单独加热过程中,由于热风进风口位于 RAP 下侧 250 mm,与 RAP 下侧相对位置保持不变,所以温度分布几乎不变。因为热风在

RAP 左右两侧同时进风进行加热,热气流在中间汇集向两侧分散,导致中部温度高于两侧温度,如图 13 (b)、(d)所示。图 13(c)相比于图 13 (a)温

度分布更加均匀,这是因为对于 RAP 上侧,热风加热空间随着加热距离增大呈上升趋势,热交换更充分,使得热风加热更加均匀。对比图 13、14 可知,混合加热相比于热风单独加热对 RAP 上、下表面加热温度都有明显提升,这是由微波加热与热风加热优势互补引起。

从图 15 中对比热风单独加热与混合加热可知,混合加热整体温度均值与均匀性均高于热风单独加热。由图 15 可知,混合加热相比于热风单独加热,在加热距离为 50 mm 时,RAP 上表面温度均值提高 95.75 °C,计算得出加热效率提高 124.70%,温度变异系数降低 0.101;RAP 下表面温度均值提高 54.12 °C,计算得出加热效率提高 38.80%,温度变异系数降低 0.014。在加热距离为 100 mm 时,RAP 上表面温度均值提高 78.07 °C,加热效率提高 92.90%,温度变异系数降低 0.049;RAP 下表面温度均值提高 75.05 °C,计算得出加热效率提高 34.80%,温度变异系数降低 0.048。混合加热的加热效率明显高于热风单独加热,加热均匀性明显好于微风单独加热,这是由于热风口位于 RAP 下方,导致 RAP 下表面受热更加充分,造成 RAP 下表面温度高于上表面温度。微波天线主要置于 RAP 上方,使得 RAP 上部分的温度均值高于下部分,造成 RAP 上表面温度高于下表面温度,这也说明加热位置对微波加热产生较大影响。综合来看,采用混合加热方式会对热风与微波加热都能产生极大的互补,在迅速提高 RAP 加热效率和加热均匀性的同时降低上、下表面温差,提高 RAP 加热效果。

## 5 结 论

1)微波单独加热 RAP 顶部及两侧布置天线的工况下,加热距离的增大会导致 RAP 左右两侧边缘处的热点现象更为明显,造成局部温度过高使两侧的 RAP 出现老化现象,降低加热效率和均匀性,影响 RAP 加热质量。

2)风温和加热距离是影响热风单独加热的主要因素。随着风温的增大,RAP 最高温度的上升速度要明显高于风速对 RAP 最高温度的影响。加热距离的增大会降低 RAP 上、下表面温差,同时提高 RAP 的加热效率和均匀性,但过高的风温使内外温差增大不利于 RAP 再生利用,因此热风应采用低温高风速。

3)混合加热 RAP 的加热效率和均匀性均高于微波单独加热和热风单独加热,表明其具有一定优势,可以实现内外同时加热,弥补单独加热方式的不足,对热风 and 微波加热都能产生极大的互补,是 RAP 再生加热的有效途径。

## 参考文献

- [1]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 & Construction Mechanization, 2020, 37(5): 44. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-033X. 2020. 05. 010
- [2]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
- [3]NORAMBUENA-CONTRERAS J, GARCIA A. Crack-healing evaluation of fibre-reinforced asphalt mixtures using microwave and induction heating[J]. Road Materials and Pavement Design, 2017: 1. DOI:10.1080/14680629.2017.1304267
- [4]向阳开,刘威震,赵毅,等. 钢渣沥青混合料微波加热自愈合性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(2): 667  
XIANG Yangkai, LIU Weizhen, ZHAO Yi, et al. Self-healing performance of steel slag asphalt mixtures by microwave heating[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(2): 667. DOI: 10.16552/j. cnki. issn1001-1625.2022.02.012
- [5]WANG Wenlong, ZHAO Chao, SUN Jing, et al. Quantitative measurement of energy utilization efficiency and study of influence factors in typical microwave heating process[J]. Energy, 2015, 87: 678. DOI:10.1016/j. energy. 2015. 05. 036
- [6]YANG Yang, FAN Zhipeng, HONG Tao, et al. Design of microwave directional heating system based on phased-array antenna[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(11): 4896. DOI:10.1109/TMTT.2020.3002831
- [7]刘小明,赵昱,魏子奇,等. 多物理场下微波加热沥青混凝土传热性能研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(7): 2321  
LIU Xiaoming, ZHAO Yu, WEI Ziqi, et al. Heat transfer mechanism of microwave heating asphalt concrete based on multi-physical field[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(7): 2321. DOI: 10.11817/j. issn. 1672-7207. 2021. 07. 019
- [8]WANG Zhihang, BAI Erlei, HUANG He, et al. Study on the electromagnetic property and microwave heating efficiency of concrete with magnetite aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2022, 342: 128080. DOI:10.1016/j. conbuildmat. 2022. 128080
- [9]杨彪,邓卓,刘志邦,等. 基于尖点突变模型的微波加热固体介质的热失控分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(2): 707  
YANG Biao, DENG Zhuo, LIU Zhibang, et al. Analysis of thermal runaway in microwave heating of solid medium based on the cusp catastrophic model[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(2): 707. DOI: 10.11817/j. issn. 1672-7207. 2022. 02. 033

- [10] 杨彪, 王世礼, 郭林嘉, 等. 基于动网格的微波加热温度均匀性数值计算方法[J]. 控制与决策, 2019, 34(1): 113  
YANG Biao, WANG Shili, GUO Linjia, et al. Numerical calculation of temperature uniformity in microwave heating based on moving mesh[J]. Control and Decision, 2019, 34(1): 113. DOI: 10.13195/j.kzyjc.2017.0985
- [11] 郑先哲, 高明, 张雨涵, 等. 功率输入模式对浆果微波加热均匀性的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(21): 303  
ZHENG Xianzhe, GAO Ming, ZHANG Yuhan, et al. Effects of input power mode on the uniformity of berry pulp in microwave heating[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(21): 303. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2021.21.035
- [12] 张春, 肖光念, 杨阳, 等. 金属壁移动对微波加热均匀性的影响[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2017, 54(5): 1062  
ZHANG Chun, XIAO Guangnian, YANG Yang, et al. The effect of moving metal wall on microwave heating uniformity[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2017, 54(5): 1062. DOI:10.3969/j.issn.0490-6756.2017.05.029
- [13] SURIYAVONGPONGSA B, WATYOTHA C. Design and performance evaluation of hot air-microwave continuous belt dryer for drying block rubber STR 20[J]. Advanced Materials Research, 2014(1044/1045): 280. DOI:10.4028/www.scientific.net/amr.1044-1045.280
- [14] 王童, 杨慧, 朱广成, 等. 热风、微波及其联合干燥对花生营养特性及感官品质的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(9): 2102  
WANG Tong, YANG Hui, ZHU Guangcheng, et al. Effects of hot air, microwave and combined drying on nutritional properties and sensory quality of peanut[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(9): 2102. DOI: 10.11869/j.issn.1000-8551.2021.09.2102
- [15] 徐艳阳, 蔡森森, 吴海成. 玉米热风与微波联合干燥特性[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(2): 579  
XU Yanyang, CAI Sensen, WU Haicheng. Combination drying characteristics of hot air and microwave for maize[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2014, 44(2): 579. DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb201402047
- [16] MIRAEI ASHTIANI S H, STURM B, NASIRAHMADI A. Effects of hot-air and hybrid hot air-microwave drying on drying kinetics and textural quality of nectarine slices[J]. Heat and Mass Transfer, 2018, 54(4): 915. DOI: 10.1007/s00231-017-2187-0
- [17] YU H M, ZUO C C, XIE Q J. Parameter optimization for microwave coupled with hot air drying process of hawthorn slices using response-surface methodology[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2015, 8(2): 121. DOI: 10.3965/j.ijabe.20150802.1596
- [18] 邹佳池, 张忠杰, 李瑞敏, 等. 粳稻热风-微波耦合干燥工艺优化研究[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(7): 167  
ZOU Jiachi, ZHANG Zhongjie, LI Ruimin, et al. Study on the optimization of hot air-microwave coupling drying process of japonica[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(7): 167. DOI:10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000099
- [19] JEPSON M R, SMITH F J. Microwave methods enable energy savings in restoration of highway pavements[C]//Proceedings of the 18th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Orlando: IEEE, 1983: 2123
- [20] LIU Jianan, WANG Zhenjun, LI Meng, et al. Microwave heating uniformity, road performance and internal void characteristics of steel slag asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2022, 353: 129155. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.129155
- [21] 马登成, 刘成启, 桂学. 915 MHz 微波在沥青路面再生加热中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(9): 44  
MA Dengcheng, LIU Chengqi, GUI Xue. Application of 915 MHz microwave in regenerative heating of asphalt pavement[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(9): 44. DOI:10.11918/202107081

(编辑 张红)