

DOI:10.11918/202108026

红外热风协同加热实验台结构设计与仿真验证

马登成¹,曹雨轩²,桂学³

(1.公路养护装备国家工程实验室(长安大学),西安 710064;2.中咨公路养护检测技术有限公司,北京 102200;
3.陕西中霖沥青路面养护科技有限公司,西安 710000)

摘要: 为了分析多种加热因素耦合作用对路面加热效果的影响规律,进行沥青路面红外辐射与热风协同加热实验研究,在分析沥青路面协同加热机理与考虑协同实验的具体要求基础上,设计了实验台的具体结构形式,并建立了沥青路面与实验台的协同加热仿真模型,借助 CFD 仿真软件进行仿真分析,实现协同加热实验台结构优化与加热性能仿真验证分析。结果表明:所设计的协同实验台能够满足红外辐射与热风协同加热实验所需的加热距离和风速要求范围,实现热风均匀分布;协同加热板在加热距离调整时能够均匀加热路面;热风发生箱能够持续为加热实验提供温度稳定、风速可控的热风,验证了实验台的加热性能等能够满足热再生协同加热多因素耦合实验研究的要求,可为协同加热实验台的设计制造与未来沥青路面热再生协同加热装置的研发提供依据。

关键词: 实验台设计;再生加热;红外辐射与热风循环;协同加热;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(2023)03-0049-09

Structural design and simulation verification of experimental platform for infrared and hot air collaborative heating

MA Dengcheng¹, CAO Yuxuan², GUI Xue³

(1.National Engineering Laboratory for Highway Maintenance Equipment (Chang'an University), Xi'an 710064, China;
2.Zhongzi Highway Maintenance and Testing Technology Co., Ltd., Beijing 102200, China;
3.Shaanxi Zhonglin Asphalt Pavement Maintenance Technology Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: The experimental study of infrared radiation and hot air collaborative heating of asphalt pavement was conducted, and the influence of coupling of different heating factors on the effect of road heating was analyzed. On the basis of analyzing the mechanism of collaborative heating on asphalt pavement and considering the specific requirements of the experiment, an experimental platform was designed and a simulation model of collaborative heating of asphalt pavement and experimental platform was established. With the aid of CFD simulation software for simulation analysis, the structural design and heating performance simulation analysis of the collaborative heating experimental platform were carried out. Results showed that the designed experimental platform could evenly distribute the hot air within the heating distance and wind speed range required for the collaborative heating experiment. The collaborative heating plate could evenly heat the road surface when the heating distance was adjusted. The hot air generator could continuously provide hot air with stable and controllable temperature and wind speed for the heating experiment. The results verified that the heating performance of the experimental platform meets the requirements of the collaborative heating experiment under multi-factor coupling, which provides a theoretical basis for the design and manufacture of collaborative heating experimental platform and the development of the collaborative heating device for thermal regeneration of asphalt pavement in the future.

Keywords: experimental platform design; regenerative heating; infrared radiation and hot air circulation; collaborative heating; simulation analysis

沥青路面的加热效率与均匀性,是制约就地热再生的两个核心关键因素^[1-2]。沥青路面就地热再生最普遍的加热方式是红外辐射与热风循环加热,众多研究也集中于此;文献[3]提出了多步法加热

工艺,较单步法能够缩减加热时间,但是增加了施工设备。文献[4]研究了沥青路面加热能量输入与温升特性间的关系。文献[5]通过控制加热热量的输出,可保持恒温加热,虽然能较好地避免沥青老化,

收稿日期:2021-08-05;录用日期:2021-11-22;网络首发日期:2022-10-26

网络首发地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20221025.1134.002.html

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

获得较好的加热均匀性,但是加热时间太长。文献[6-8]对加热滚筒内部的沥青混合料流场和加热板结构与沥青混合料间的传热关系进行了分析。文献[9]得出了热风加热参数与沥青路面表面换热系数间的关系。文献[10]对热再生过程中的沥青路面温度场进行了数值模拟,建立了沥青路面表面温度与路面不同深度处温度之间的关系。但是,由于单独的红外辐射或热风加热,都无法使路面加热达到理想的效果,红外辐射与热风循环加热的优势与劣势之间,存在一定的交叉互补性,且多因素协同加热中存在耦合作用,因此对沥青路面加热效果的影响还有待深入研究,这使得研究两者协同加热就有了必要。文献[11]提出了一种红外辐射和热风复合加热型沥青再生养护车,具有加热柔和、热效率高、节能等优点。文献[12-14]对红外辐射与热风循环协同加热进行了理论与仿真分析,证明其是一种既具有热风加热均匀性好,温度梯度小,又具有红外加热速度快、渗透深的加热方法,还能够避免沥青路面就地热再生时沥青起火、老化,影响再生质量的问题。文献[15]通过有限元模拟和试验研究的方法,分析了沥青路面在辐射加热和热风加热中温度场的变化。与此同时,在农产品干燥领域同样进行着相关协同加热的研究,如文献[16]研制了红外-热风组合式蔬菜烘干机,得出组合干燥效果优于单独红外辐射干燥效果的结论。文献[17]提出红外与热风协同加热中红外较高的热效应,能够实现物料内外同时干燥,提高干燥效率。文献[18]进行了红外辐射与热空气对流对食物干燥系统的研究,研究表明这种协同食物干燥系统具有能耗低、可持续性的优势。从以上分析可以看出,很多学者对沥青路面的红外辐射与热风协同加热方法进行持续探索,但由于缺少合适的实验设备,目前主要还是通过建模、仿真的方法,对协同加热时其参数变化对加热效率与均匀性的影响规律进行研究,许多结论也停留于理论分析阶段,无法得到实验的验证。因此,本文从实际工况出发,以红外辐射与热风循环两种加热方法为耦合对象,开发沥青路面加热所需要的红外辐射与热风循环协同加热实验台。根据三维模型,建立加热装置的仿真模型,利用 FLUENT 有限元软件,对加热装置的加热能力进行仿真验证,并利用加热装置模型对沥青路面模型,进行多因素耦合求解计算。

1 协同加热机理分析

沥青路面再生加热过程中,实际辐射传热和对流换热两种形式同时存在。红外辐射会加热路面上

方的空气,被加热的空气又产生对流换热;热风加热时构造循环系统的封闭空间壁面与热风出风板等,都会在热风的作用下温度升高,也会对沥青路面产生辐射传热。因此协同加热时,路面的路表热流 q 主要来源于热风的对流换热和辐射传热两部分^[12],即

$$q = h[T_i - T_f] + \varepsilon_s \sigma_b [T_m^4 - T_f^4] \quad (1)$$

式中: T_i 为沥青路面表面任一时刻的温度, K; T_f 为热空气温度, K; h 为表面传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; T_m 为红外辐射加热板表面温度, K; σ_b 为斯蒂芬-玻尔茨曼常量, $\sigma_b = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot g \cdot K^4)$; ε_s 为系统黑度。其中,表面传热系数 h 与众多因素有关,在沥青路面对流换热中通常采用式(2) Solaimanian 经验公式计算。

$$h = 698.24 \left[0.00144 \left(\frac{T_w + T_f}{2} \right)^{0.3} v^{0.7} + 0.00097 (T_w - T_f)^{0.3} \right] \quad (2)$$

式中: T_w 为沥青路面表层温度, K; v 为高温气体的流速, m/s。

辐射换热中,灰体表面只吸收一部分辐射,其余反射出去,这样在灰表面间形成多次吸收、反射。灰体表面的有效辐射 J_1 如图 1 所示,由表面的本身辐射 $\varepsilon_1 E_{b1}$ 和投入辐射的反射 $\rho_1 G_1$ 组成,其辐射换热计算公式^[19]为

$$J_1 = \varepsilon_1 E_{b1} + \rho_1 G_1 = \varepsilon_1 E_{b1} + (1 - \alpha_1) G_1 \quad (3)$$

式中: G_1 为单位时间外界对表面 1 单位面积的投射辐射, W/m^2 ; ρ_1 、 α_1 分别为表面的反射比和吸收比。

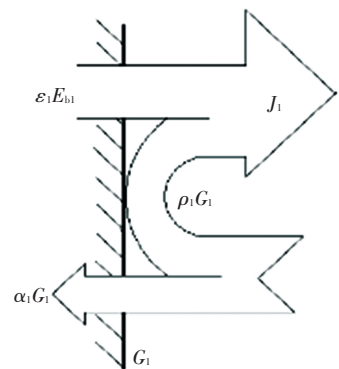


图 1 有效辐射示意图

Fig.1 Schematic diagram of effective radiation

将红外辐射板与沥青路面之间的辐射传热过程进行简化,假设两者均为漫-灰表面,且表面间的介质不参与辐射传热。表面 1 和表面 2 的温度分别为 T_1 、 T_2 , 表面发射率分别为 ε_1 、 ε_2 , 表面的辐射力分别为 E_1 、 E_2 , 表面的吸收比分别为 α_1 、 α_2 , 则在两个灰表面间形成多次吸收、反射的辐射传热模型如图 2 所示。

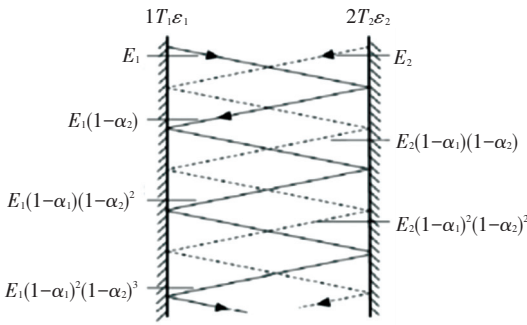


图2 两表面间辐射传热模型

Fig.2 Radiative heat transfer model between two surfaces

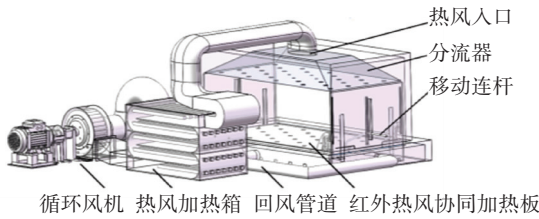
假设漫-灰表面的发射率与吸收比相等,即 $\epsilon_1 = \alpha_1, \epsilon_2 = \alpha_2$ 。根据固体间表面辐射传热模型推导得到系统黑度 ϵ_s 的计算公式为

$$\epsilon_s = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (4)$$

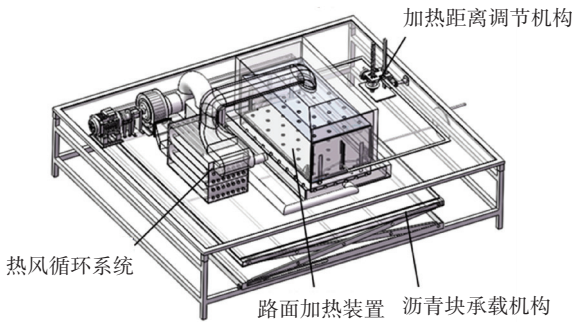
式中: ϵ_1 为红外辐射加热板的辐射发射率; ϵ_2 为沥青路面的辐射发射率。

2 实验台结构及参数设计

实验台要进行沥青路面红外辐射与热风协同加热实验,以分析协同加热时两种方式相互影响规律与参数匹配关系,其结构如图3所示。



(a)主视图



(b)俯视图

图3 协同加热实验台

Fig.3 Collaborative heating experimental platform

参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中沥青混合料试件的规格,实验台沥青路面加热区设计长为1200mm,宽为600mm,加热区域面积为0.72m²,其内部结构如图4所示。

其协同加热板由加热板框架、红外辐射板、金属反射板、多根电加热管、热风孔、滑触线和在板架的一对侧边上设置的导电棒等组成,具体结构如图5所示。为实现热风循环,在实验台底部四周设有回风管道,对加热路面块后还有余温的气体进行回收。

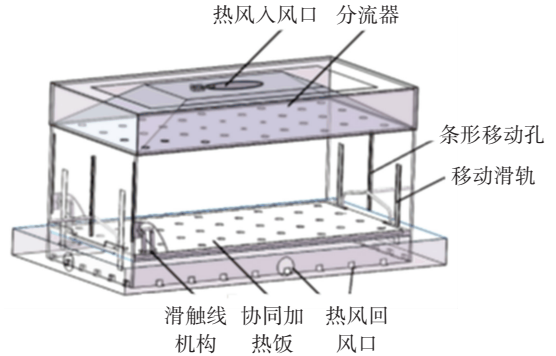


图4 实验台加热区内部结构

Fig.4 Internal structure of heating zone of experimental platform

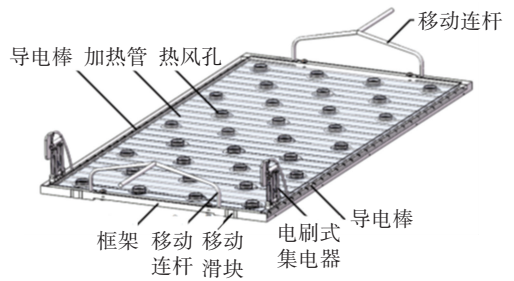


图5 红外辐射与热风协同加热板

Fig.5 Infrared radiation and hot air collaborative heating plate

其热风发生箱结构如图6所示,设计为U形加热风道,加热管轴向与空气流动方向平行,使得流体在管道内受到的阻力最小。入风口接循环风机实现热风在整个实验台的循环。

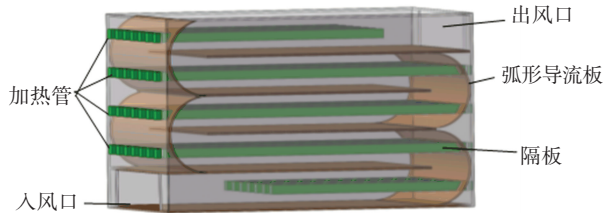


图6 热风发生箱

Fig.6 Hot air generator

其加热距离调节机构如图7所示,包括底座以及在底座下方固定安装的推力球轴承,底座上面安装有提升蜗杆,提升蜗杆的下端与大锥齿轮相连,大伞齿轮与小锥齿轮啮合,小锥齿轮与手轮同轴连接,控制支臂升降和下降。固定器用来调整支臂在提升蜗杆上的高度位置,当加热距离需要调节时,解除固定,此时转动手轮,带动红外热风协同加热板上下移动;当调整到某一需要的位置时,恢复固定,完成加

热距离调节。

其沥青路面实验块承载平台用于承载实验中所用的沥青路面块,能够调节沥青路面块与协同加热板的距离,实现不同加热距离的实验,其结构如图 8 所示。

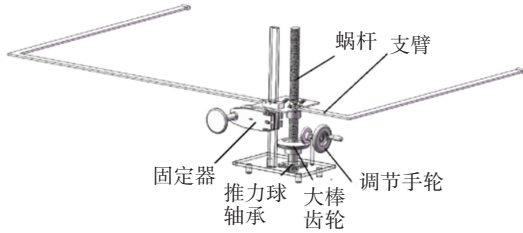


图 7 加热距离调节机构

Fig.7 Heating distance adjustment mechanism

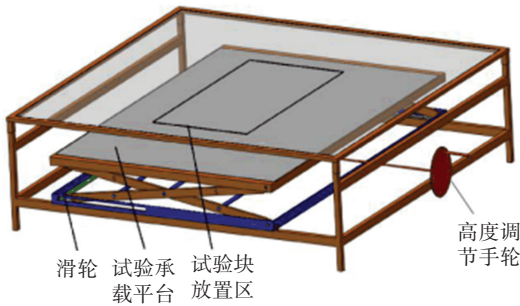


图 8 沥青路面实验块承载平台

Fig.8 Asphalt pavement test block bearing platform

实验中,红外辐射参数主要有辐射温度和距离,辐射温度通过调节电热元件的加热功率实现;辐射距离通过调节协同加热板与加热块间的距离确定。热风参数主要有风速和热风口到路面实验块的距离,参考文献[13]设置热风风速为 3~21 m/s;加热距离为 5~35 cm。

为防止热风入口喷嘴与红外辐射加热板在加热过程中相互干扰,将热风循环的热风孔置红外辐射加热板面上。多个热风入口的排布方式以正三角形排布,对热风入口之间的相互干扰最小,故选取热风孔为直径为 3 cm 的圆形,两个相邻热风入口的孔中心距为 15 cm 并成正三角形交错排布,如图 9 所示。

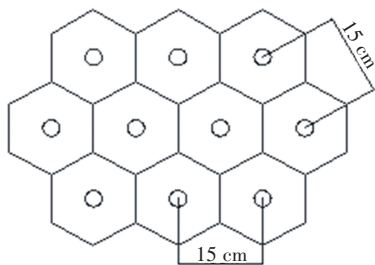


图 9 协同加热板上热风孔的排布方式

Fig.9 Arrangement of hot air holes on collaborative heating plate

3 实验台建模与仿真分析

建立沥青路面与实验台仿真模型,对加热实验装置内部的流场和温度场仿真分析,验证实验台加热性能,检验其是否满足协同加热实验要求。

3.1 沥青路面结构

沥青路面结构如图 10 所示,沥青混凝土材料的导热系数随温度的变化而变化,3 种沥青混合料材料 AK-16、AC-20、AC-25 在不同温度下的近似导热系数见表 1,沥青路面中不同材料的其他物理性质参数见表 2。

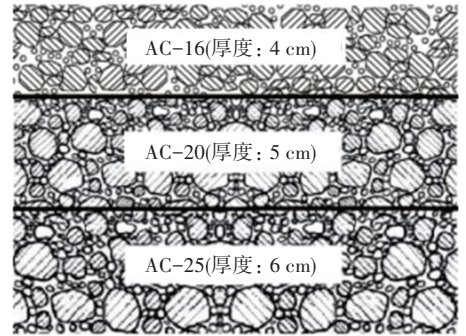


图 10 沥青路面结构示意图

Fig.10 Schematic diagram of asphalt pavement structure

表 1 沥青混凝土在不同温度下导热系数

Tab.1 Coefficient of thermal conductivity of asphalt pavement at different temperatures

温度/K	293	313	333	353	373	393	413	433	>433
导热系数/(W·(m·K) ⁻¹)	1.07	1.25	1.59	1.95	2.07	2.15	2.32	2.52	2.52

表 2 沥青路面中不同材料的其他物理性质参数

Tab.2 Physical properties of different materials in asphalt pavement

沥青混合料类型	比热容/(J·(kg·K) ⁻¹)	密度/(kg·m ⁻³)
AK-16	850	2 000
AC-20	920	2 100
AC-25	980	2 050

3.2 验台模型建立与仿真分析

3.2.1 仿真参数的选择

选择多表面辐射模型作为红外辐射加热模型。设置红外辐射加热板的发射率为 0.92、沥青路面表面对红外辐射的吸收率为 0.9^[12]。在热风加热中,当风速超过 21 m/s,对流换热的效率会大幅下降,故取仿真中最大风速为 21 m/s^[9];设置热风的最小温度为 180 ℃,此时循环系统中流体的马赫数远小于 0.3,热风的类型设置为不可压缩的理想气体,选用带旋流修正的 *k-e* 模型。

3.2.2 实验装置整体加热效果仿真分析

协同加热仿真中,热风从顶部进入,通过红外热风加热板中的热风孔喷向沥青路面,回风管道回收加热沥青路面后还有余温的气体。设置加热板与沥青路面表面间的距离为 15 cm,风速为 15 m/s,仿真模型如图 11 所示。

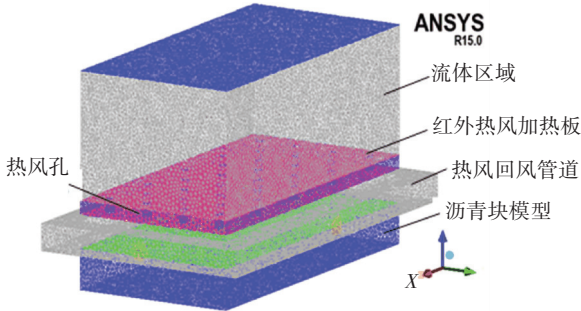


图 11 加热实验装置整体三维仿真模型

Fig.11 Overall 3D simulation model of heating experimental device

实验台内部温度场及流场如图 12 所示。由于加热管与红外辐射板之间通过热传导传递热量,热量传递速度快,认为两者的温度基本一致。另外,在仿真加热温度调整中,由于设置的热风温度高于红外辐射温度,因此在热风的作用下,红外热风加热板的四周温度略高于其他区域。经仿真计算,在环境温度 26 ℃、加热管温度 900 ℃,红外辐射板由 26 ℃ 加热至 700 ℃ 需 116 s。

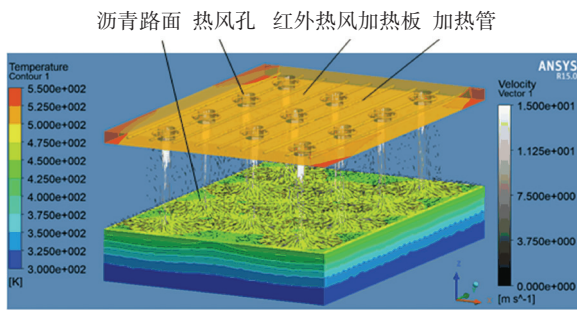


图 12 实验台内部温度场及流场图

Fig.12 Internal temperature field and flow field of experimental platform

由图 12 中的热风流线分布可以看出,热风能够遍布整个沥青实验块的表面,且热风孔之间的相互影响较小。由图 13 沥青路面受热温度云图可知,由于热风孔的排布方式及回风口的集中布置,导致沥青路面表面出现局部温度低、四周温度高的现象。在表面温度 180 ℃、路面深度 4 cm 处温度达 90 ℃ 的情况下,沥青路面表面整体的最大温差为 20 ℃、局部的最大温差为 35 ℃。但在协同加热的作用下,沥青路面受热均匀,整体加热效果良好。表明实验台加热板的结构设计可以满足实验所需。

3.3 热风均匀性仿真分析

热风分流器的均流效果会对沥青路面的加热均匀性产生影响。一是根据加热实验的不同参数,分流器的热风入口风速不同,即流体通过分流器的流速不同。二是分流器固定在实验台顶部,协同加热板随着加热距离的调整需上下移动,导致分流器与加热板的热风出风孔之间的距离不固定。当加热距离为 50 mm 时,分流器距加热板的距离为 451 mm;当加热距离 350 mm 时,分流器距加热板的距离为 151 mm。因此,分别选择风速和加热距离的最大和最小值,进行两因素两水平的分流器分流性能仿真。热风入口的边界条件设置为速度入口,热风从顶部热风入口流入,经过分流器中的热风出口,从加热板中的热风孔中流出,出风孔压力设为标准大气压。

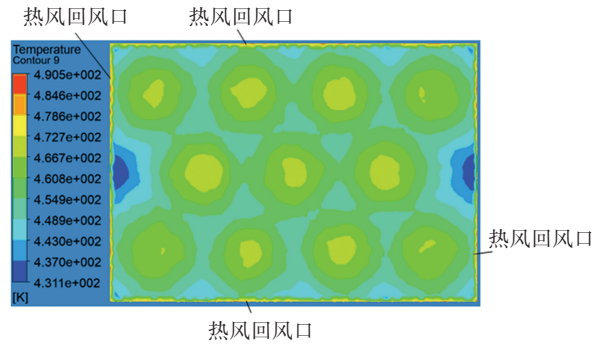


图 13 沥青路面受热温度云图

Fig.13 Heating temperature cloud map of asphalt pavement

分流器距离加热板 451 mm 时的速度云图如图 14 所示。热风由最上方椭圆形热风入口进入到分流器内,先通过分流器中较大孔径热风出口,进入下方的加热板出风孔喷出。从图 14 中加热板底面的速度云图可以看出,热风能够均匀地从出风孔中喷出。

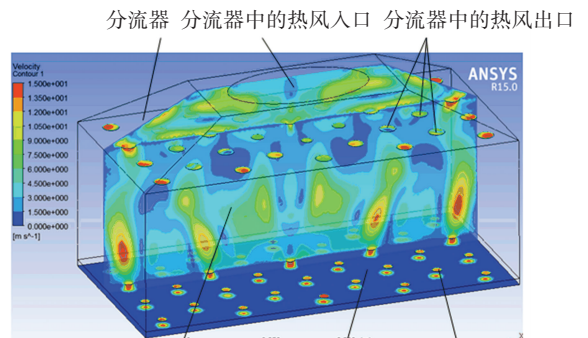


图 14 速度云图

Fig.14 Speed cloud map

分流器距加热板 151 mm 时的热风流线如图 15 所示。图中流线中的不同颜色表示热风流经时的风速,可以看出热风从流进到流出的过程中风速不断增加。

热风流经出风口后的速度云图如图 16 所示,可以看出热风在分流器的作用下能够均匀地从协同加

热板热风孔中喷出。距离 151 mm 的出风口风速为 3 m/s,边缘 4 个角处的出风口风速较低,风速与其他出风口相差 1 m/s 左右,其他出风口风速均匀且

稳定在 3 m/s,进、出风孔之间压差为 3 Pa;出风口风速为 21 m/s,各热风孔之间的流速分布均匀,进、出风孔之间压差为 100 Pa。

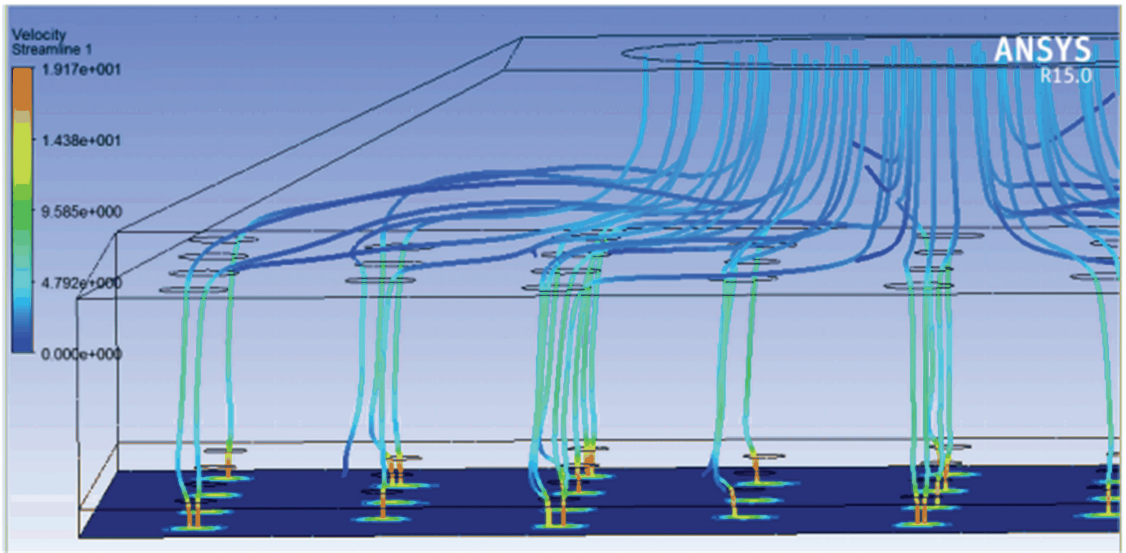


图 15 热风流线图

Fig.15 Hot air flow diagram

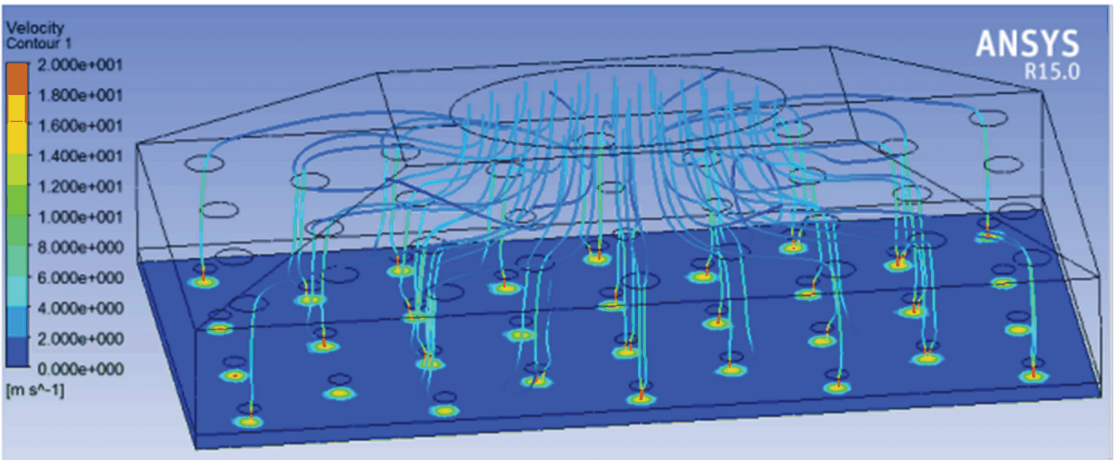


图 16 热风速度云图

Fig.16 Hot air speed cloud map

距离 451 mm 的加热板出风口风速为 3 m/s,四周的出风口流速比距离为 151 mm 时分布均匀,出风口中心的风速为 4 m/s,进出风孔之间压差为 2 Pa;出风口风速为 21 m/s,各热风孔之间的流速分布均匀,进出风孔之间压差为 70 Pa。

可见,距离 451 mm 时,同一个出风口中的风速值离散性大于距离为 151 mm 的高散性;热风在流经 151 mm 模型的过程中压力损失大,在实验台处于最大加热距离工况时,热风循环系统内需要施加较大的风压。综上,该分流器的结构设计能够在实验所需的加热距离和风速范围内,将热风均匀分布,满足实验要求。

3.4 热风发生箱加热能力仿真分析

在协同加热实验中,实验台需要在不同风速下稳定地输出热风。为此需对热风循环加热进行仿真,并依此优化热风加热箱的结构。加热中实验台与沥青路面组成封闭空间,热风在此空间内循环加热,为验证热风加热箱加热能力,需要将其单位时间内对最大的热风输出量与沥青路面单位时间内对热风最大的吸热量进行对比。因为当热风温度最高、沥青路面表面温度最低时,沥青路面单位时间内吸热量最多,此时加热沥青路面后的热风回风温度最低,沥青路面在一个循环加热过程中吸热量最高,对加热器的加热能力要求最大。因此在该工况下进行

加热能力验证。

3.4.1 热风加热箱加热性能仿真分析

通过利用 700 °C 的热风对 26 °C 沥青路面进行加热,检测回风温度来计算在不同风速下,沥青路面对热风热量的最大吸收能力,用沥青路面吸热系数表示为

$$k = \frac{T_{inlet} - T_{outlet}}{T_{inlet}} \quad (5)$$

式中: k 为沥青路面吸热系数, T_{inlet} 为热风对沥青路面加热前的温度, T_{outlet} 为热风对沥青路面加热后的回风温度。

设置沥青路面块的温度为 26 °C,调整热风循环加热温度为 700 °C,风速为 21 m/s 时,将稳态计算转化为瞬态计算。待 5 s 后回风温度稳定,此时回风温度为 629.3 °C,热风对沥青路面加热前后的温差为 70.7 °C,计算得沥青路面吸热系数 $k_1 = 0.101$ 。

同上,设置沥青路面块与热风温度与上相同,改变风速为 15 m/s,待 4.5 s 后回风温度稳定,此时回风温度 616.7 °C,热风对沥青路面加热前后的温差为 83.3 °C,沥青路面吸热系数 $k_2 = 0.119$ 。

风速为 3 m/s 时,待加热 40 s 后回风温度稳定,此时回风温度 494.9 °C,热风对沥青路面加热前后的温差为 205.1 °C。此时沥青路面吸热系数 $k_3 =$

0.293。

通过最大散热系数的确定,求出不同风速下沥青路面的最大吸热系数 k 。将其代入式 $700 \times (1 - k)$ 中,计算得到热风加热后的回风温度,将该温度的热风输入到加热箱中进行加热,检验从加热箱中输出的热风温度是否达到 700 °C。由于风速在 3~21 m/s 之间的热风,其吸热量和放热量均处于最大风速和最小风速之间,所以只需要验证并满足最大、最小风速两种工况下的热风加热箱的加热能力即可。

热风循环加热系统中,由于热风加热箱内通流截面积与热风孔的横截面积总和不同,所以相同时刻协同加热板中热风孔的风速与热风加热箱内热风风速不同。红外热风加热板中的热风孔横截面积总和为 22 608 mm²;热风加热箱内通流截面积为 78.35 mm×390 mm-400 mm×7 mm=27 756.5 mm²。热风孔中的风速与热风加热箱内风速之比为 1 : 0.815,最大、最小风速在热风孔与热风加热箱间的对应关系:热风孔中平均风速 21、3 m/s 分别对应加热箱内平均风速为 17.1、2.5 m/s。

设置加热管表面温度为 900 °C,热风温度为加热沥青路面之后的回风温度,风速为 17.1 m/s 和 2.5 m/s,对热风加热箱的加热能力进行仿真分析。仿真结果如图 17 所示。

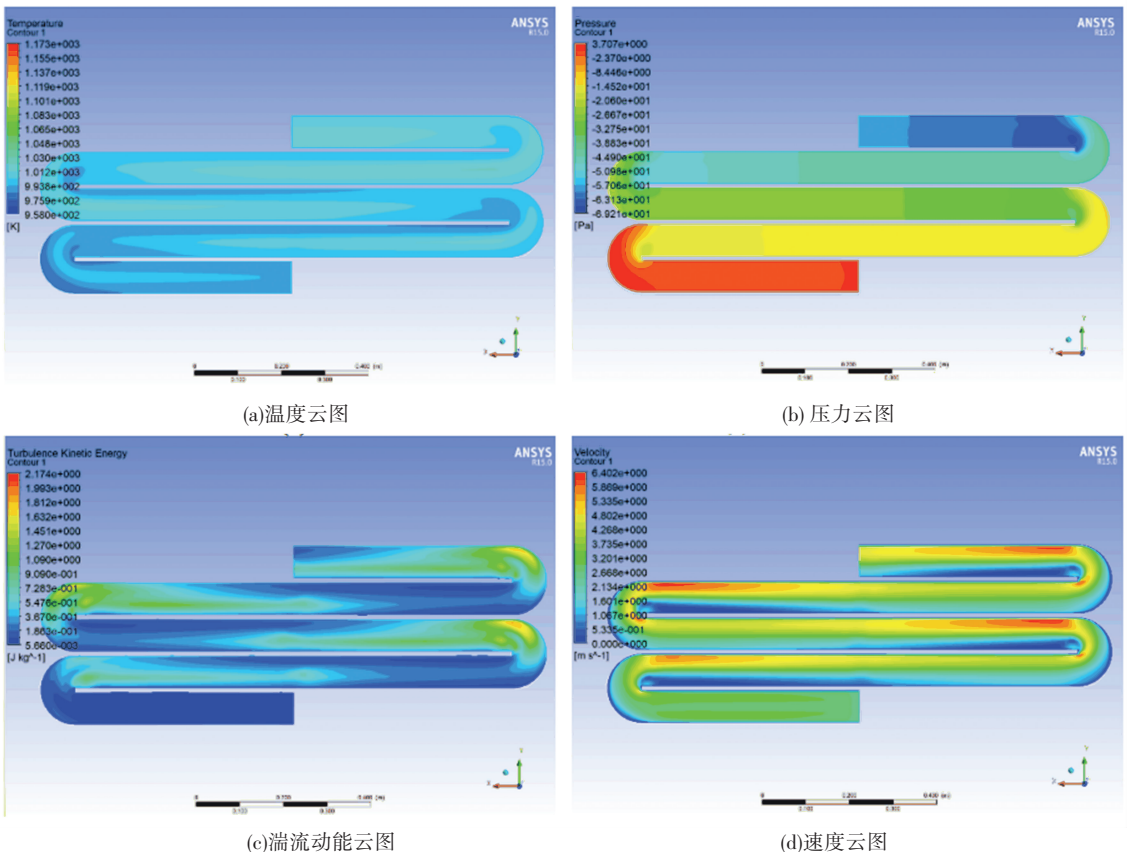


图 17 热风加热箱加热能力仿真云图

Fig.17 Simulation cloud map of heating capacity of hot air heating device

由图 17 (a) 可知,热风温度随着流动方向逐渐增加;图 17(b) 显示热风压力在刚进入加热管时最高,随经过弯管个数的增加逐渐降低;图 17(c) 显示在弯管的出口处流体的湍流度较高,流经在直管区域时湍流度下降;图 17(d) 显示加热管内流速分布不均,较高的流速出现在直管的上部、弯管的内侧和弯管出口处,并在弯管的出口处存在气体的混合。当加热管道内风速为 17.1 m/s 、进风温度为 $602 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,出风口温度稳定在 $702 \text{ }^\circ\text{C}$,可以达到目标要求。当加热管道内风速为 2.5 m/s 、进风温度为 $495 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,出风口温度稳定在 $667 \text{ }^\circ\text{C}$,未达到目标设计的 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ 要求。在风速降低后,空气与沥青路面热交换的时间和空气在热风加热箱中加热的时间同时延长,需要对实验台热风加热箱结构进一步优化。

3.4.2 热风箱结构优化

经分析可采取下述 3 种方案实现对热风加热箱结构优化:1) 延长加热管道长度。为了分析延长加热管长度后热风加热箱的加热能力,将上文中 2.5 m/s 风速下的计算结果 $667 \text{ }^\circ\text{C}$ 作为热风入口边界条件,进行加热仿真分析,检测其出口热风温度。仿真结果显示出风口温度稳定在 $704 \text{ }^\circ\text{C}$,达到设计要求。在此方案中,增加热风加热箱长度的同时也导致了管道内风阻增加,需加大循环风机的功率。2) 提升加热管最高温度。设置加热管温度为 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$,加热管道内风速为 2.5 m/s ,进风温度为 $495 \text{ }^\circ\text{C}$,重新进行仿真。仿真结果显示稳定后的出风口温度为 $711 \text{ }^\circ\text{C}$,达到设计要求。经计算,加热管最高额定温度为 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,加热箱的热风循环加热系统能够满足实验的使用要求。3) 强化对流换热。通过提高热风加热箱单位传热面积的换热量,可在风道处增设风扇,提高对流换热的效率,如图 18 所示。当热风加热箱内空气的流速较低时,内部电加热管的加热效率较低,导致出口温度偏低。通过强化对流换热,加强热风之间的混合,从而提高加热管单位面积上的热流量,达到强化换热的目的。

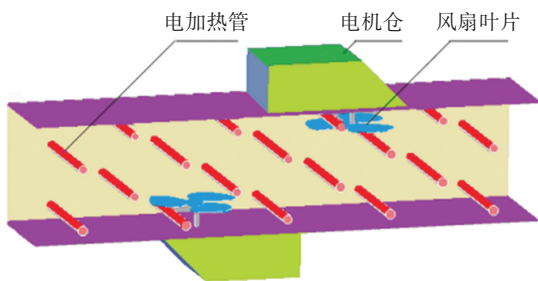


图 18 风道处增设风扇

Fig.18 Adding a fan to the duct

4 结 论

1) 结合沥青路面红外辐射与热风协同加热的实验研究需求,设计了可用于多因素耦合协同加热的沥青路面协同加热实验台,确定了相关参数。

2) 通过仿真对热风加热管道内部的流场进行分析,计算了热风加热箱的最大加热能力,并提出了多种热风加热箱优化方案。

3) 建立了沥青路面与实验台三维仿真模型,进行了仿真分析,验证了实验台的加热性能等能够满足沥青路面协同加热多因素耦合实验研究的需求。为协同加热实验台的设计制造与未来沥青路面热再生协同加热装置的研发提供理论依据与借鉴。

参考文献

- [1] HAFEEZ I, OZER H, AL-QADI I. Performance characterization of hot in-place recycled asphalt mixtures[J]. Journal of Transportation Engineering, 2014, 140(8): 04014029. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000679
- [2] LIU Yang, WANG Hainian, TIGHE S, et al. Study on impact of variables to pavement preheating operation in HIR by using FEM [J]. Construction and Building Materials, 2020, 243 (C): 118304. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118304
- [3] 顾海荣,董强柱,梁秦典,等.多步法就地热再生工艺中的沥青路面加热速度[J].中国公路学报,2017, 30(11): 170
GU Hairong, DONG Qiangzhu, LIANG Fengdian, et al. Asphalt pavement heating speed in multi-stage hot in-place recycling [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(11): 170. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.11.019
- [4] 董强柱,顾海荣,张琰,等.就地热再生过程中的沥青路面加热功率控制[J].中国公路学报,2016,29(4): 153
DONG Qiangzhu, GU Hairong, ZHANG Hui, et al. Heating power control in asphalt pavement in-place hot recycling [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(4): 153. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2016.04.019.
- [5] XU X X, GU H R, DONG Q Z, et al. Quick heating method of asphalt pavement in hot in-place recycling [J]. Construction and Building Materials, 2018, 178(7): 211. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.091
- [6] 马登成,李旋,李宗,等.加热板形状对沥青混合料滚筒加热效率的影响[J].甘肃农业大学学报,2017,52(4): 182
MA Dengcheng, LI Xuan, LI Zong, et al. Influence of heating place shape on heating efficiency of asphalt mixture [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2017, 52(4): 182. DOI: 10.13432/j.cnki.jgsau.2017.04.027
- [7] 马登成,李旋,李宗.叶片结构对沥青混合料加热滚筒温度场分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2017,40(7): 871
MA Dengcheng, LI Xuan, LI Zong. Analysis of the effect of blade structure on asphalt mixture heating roller temperature field [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2017, 40(7): 871. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5060.2017.07.002
- [8] 马登成,李旋,李宗,等.沥青混合料搅拌加热滚筒设计及加热效率模拟与验证[J].农业工程学报,2016,32(15): 104
MA Dengcheng, LI Xuan, LI Zong, et al. Design of asphalt mixture

- stirring roller and simulation and validation of heating efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(15): 104. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.15.015
- [9] MA D C, LAN F. Numerical simulation analysis on multi-layer low-temperature heating method of asphalt pavement in hot in-place recycling[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(12): 3793. DOI: 10.1007/s11771-020-4577-6
- [10] LEE K H, LIM J S, JEONG K D, et al. Finite element analysis of heat transfer effects on asphalt pavement heated by pre-heater unit used in hot in-place recycling[J]. International Journal of Highway Engineering, 2016, 18(2): 73. DOI: 10.7855/IJHE.2016.18.2.073
- [11] 吴鹏,温永康,仇晓骏.一种红外辐射和热风复合加热型沥青路面养护车: CN201410222560.1[P].2014-05-26
WU Peng, WEN Yongkang, QIU Xiaojun. A kind of infrared radiation and hot air composite heating type asphalt road maintenance vehicle: CN201410222560.1[P].2014-05-26
- [12] 马登成,姚锦涛,曹雨轩.加热距离与风速对协同加热沥青路面的影响[J].华中科技大学学报(自然科学版),2020,48(11):67
MA Dengcheng, YAO Jintao, CAO Yuxuan. Effect of heating distance and wind speed on coupling heating asphalt pavement[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(11): 67. DOI: 10.13245/j. hust. 201111
- [13] 李旋,马登成,刘晓辉,等.沥青路面红外热风复合式加热效果数值计算分析[J].东南大学学报(自然科学版),2021,51(4):658
LI Xuan, MA Dengcheng, LIU Xiaohui, et al. Numerical simulation analysis on heating effects of asphalt pavement by infrared and hot air compounding heating[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(4): 658. DOI: 10.3969 /j. issn. 1001-0505.2021.04.015.
- [14] 姚锦涛.红外与热风协同加热沥青路面影响因素仿真分析[D].西安:长安大学,2018
YAO Jintao. Simulation analysis of influencing factors of infrared and hot air synergistic heating asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018
- [15] 李旋,马登成,杨士敏.沥青路面就地热再生加热方式[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(4):1290
LI Xuan, MA Dengcheng, YANG Shimin. Heating method for in-place heat recycling of asphalt pavement[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(4): 1290. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2016.04.027
- [16] HEBBAR H U, VISHWANATHAN K H, RAMESH M N. Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 65(4):557. DOI:10.1016/j.foodeng.2004.02.020
- [17] 谢小雷,张春晖,贾伟,等.连续式中红外-热风组合干燥设备的研制与试验[J].农业工程学报,2015,31(6):282
XIE Xiaolei, ZHANG Chunhui, JIA Wei, et al. Development and test of continuous combined mid-infrared with hot air drying equipment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(6): 282. DOI: 10.3969/J. ISSN. 1002-6819. 2015.06.039.
- [18] EL-MESERY H S, ABOMOHR A E, KANG C, et al. Evaluation of infrared radiation combined with hot air convection for energy-efficient drying of biomass[J]. Energies, 2019, 12(14):2818. DOI: 10.3390/en12142818
- [19] 章熙民,任泽霏,梅飞鸣.传热学[M].北京:中国建筑工业出版社,2007
ZHANG Ximin, REN Zepei, MEI Feiming. Heat transfer[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007

(编辑 魏希柱)