

沥青路面热风循环加热机导流板结构参数优化

刘泽源¹, 张洪丽^{1*}, 张青梅², 王义清¹

1. 山东交通学院工程机械学院, 山东 济南 250357;

2. 江苏省产业技术研究院道路工程技术与装备研究所, 江苏 徐州 221004

摘要:为提高沥青路面热风循环加热效率,以热风循环加热机导流板为研究对象,采用有限差分法和泰勒级数展开法对射流冲击传热问题进行数值求解,建立沥青路面流固耦合传热模型;采用有限元软件 FLUENT 仿真分析热风射流冲击传热流场,研究导流板内侧倾斜角度(45°、50°、55°、60°、65°、70°)、外侧倾斜角度(30°、35°、40°、45°、50°)对加热效率的影响规律,采用正交试验设计法制定30组试验方案,获得不同内、外侧倾斜角度下沥青路面的温度场分布;计算特定温度目标下热风循环加热时长,确定热风循环加热机导流板的结构参数。结果表明:当内、外侧导流板倾斜角度不变时,加热效率随外、内侧导流板倾斜角度的增大先减小后增大。当内、外侧导流板倾斜角度分别为60°、40°时,热风循环加热沥青路面的加热效率较高。

关键词:热风循环加热;导流板;倾斜角度;流固耦合;加热效率

中图分类号:U418.3;TK172

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)01-0090-10

引用格式:刘泽源,张洪丽,张青梅,等. 沥青路面热风循环加热机导流板结构参数优化[J]. 山东交通学院学报, 2025,33(1):90-99.

LIU Zeyuan, ZHANG Hongli, ZHANG Qingmei, et al. Optimization of deflector plate structure parameters for hot air circulation heating machine of asphalt pavement[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025,33(1):90-99.

0 引言

2023年我国公路总里程已达 5.4368×10^6 km,位居世界首位^[1]。正常情况下,高速公路、一级公路设计使用年限为15 a^[2]。21世纪初修建的沥青路已超过使用年限,沥青路面出现不同程度的损坏,行车安全性和舒适度降低。采用合理的沥青路面养护技术可恢复沥青路面的路用性能,保证行车安全。目前,就地热再生技术在沥青路面养护中得到广泛应用。该技术采用就地热再生施工设备对旧沥青路面进行加热、铣刨,在旧沥青路面混合料中加入新沥青和再生剂,现场拌和、摊铺和碾压等作业。相对传统冷再生技术,就地热再生技术的优点是在铣刨前加热旧沥青路面,在铣刨时不会破坏旧沥青路面混合料的级配,在拌和前加入新沥青和再生剂,保证新沥青路面沥青混合料的抗疲劳性能,且全部回收利用原有旧沥青路面混合料。

在热风循环加热^[3-6]沥青路面过程中,热风循环加热机导流板的结构参数对沥青路面加热效率有重要影响。Park等^[7]建立射流冲击传热的近壁湍流模型,可预测强应变湍流传热问题;Gu等^[8]、Xiao等^[9]、肖茹^[10]、张江勇等^[11]采用响应曲面法分析不同热风参数对热量利用率的影响,得到最佳热风温度

收稿日期:2024-06-27

基金项目:交通运输行业重点科技项目(2021-MS2-074)

第一作者简介:刘泽源(1998—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向为道路工程和智能制造,E-mail:2224635707@qq.com。

*通信作者简介:张洪丽(1976—),女,山东德州人,教授,硕士研究生导师,工学博士,主要研究方向为高效精密复合加工技术及装备、智能机器人结构设计,E-mail:63027776@qq.com。

和速度;徐信芯等^[12-13]提出一种基于多喷嘴热风加热沥青路面的变温加热方法,极大改善了沥青路面的再生质量;刘文佳^[14]通过正交实验法,采用流体仿真软件 FLUENT 对连续式加热和间歇式加热方式进行仿真分析,发现间歇式加热方式的加热效果较好。目前多依赖操作员的施工经验设置沥青路面热风循环加热过程中导流板的结构参数,缺乏理论依据。

本文基于传热学和流体力学的理论基础,研究热风循环加热沥青路面的主要影响因素和传热规律,建立沥青路面的流固耦合传热模型,采用软件 FLUENT 研究导流板的结构参数对沥青路面加热效率的影响,确定最优导流板内、外侧倾斜角度,以期提高沥青路面热风循环加热的效率。

1 热风循环加热原理

热风循环加热机主要由燃烧器、循环风机、助燃风机、温度传感器、温度控制装置、热风加热腔和热风加热腔组成^[15-17]。热风循环加热原理示意图如图1所示。燃料和助燃空气在燃烧器中充分混合后燃烧,最高温度可达 973.15 K,燃烧后产生的高温烟气将热风加热腔中的空气加热,由循环风机将其吹向热风加热腔,经热风加热腔中导流板的分流,使热风均匀分布在加热腔的出风面板上,通过热风加热腔底部的通风孔喷向沥青路面,将沥青路面加热到合适的温度后,带有余温的部分热风在循环风机的作用下经回风通道进入热风加热腔,实现热风的循环利用^[18-19]。其余热风进入周围环境,经助燃风机进入燃烧器。在热风循环加热机工作过程中,采用温度传感器监测热风温度,通过温度控制装置调节燃料出口流量阀门,控制进入燃烧器的燃料量。

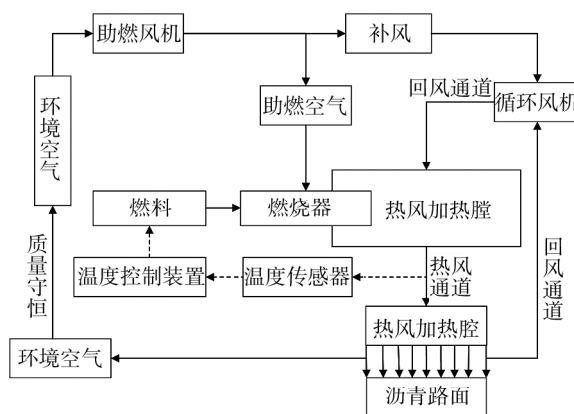


图1 热风循环加热原理示意图

2 建立射流冲击传热模型

热风循环加热机中燃料燃烧产生的高温烟气及热风加热腔中热风为传热介质。根据热风循环加热原理和传热特性,沥青路面热风循环加热属于射流冲击传热问题^[20-22],其数值求解基本步骤如图2所示。1)建立控制方程与定解条件,采用有限差分法和泰勒级数展开法把时空坐标系中连续分布的温度场离散化,建立离散方程组。2)简化热风与沥青路面间复杂传热过程,设置温度场的迭代初始条件,求解离散方程组。3)得到沥青路面温度场分布近似解,并对求解结果后处理。

2.1 数学模型

为简化分析,对沥青路面射流冲击传热问题作如下假设:流体为三维非定常流动,流体为不可压缩的牛顿型流体,流体物性为常数、无内热源,黏性耗散产生的耗散热忽略不计。

在热风与沥青路面的对流传热过程中,流体相和固体相同时存在,热风与沥青路面间温度场

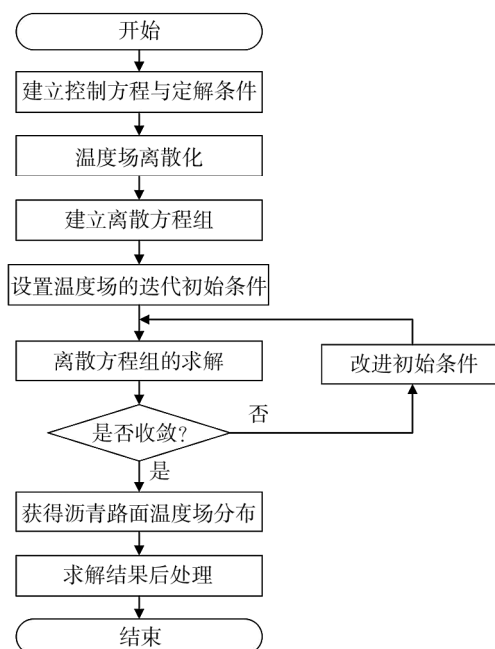


图2 射流冲击传热数值求解基本步骤

为复杂的流固耦合状态,需建立热风与沥青路面流固耦合传热数学模型。热风加热腔出风面板采用圆形通风孔,其速度场和温度场呈轴对称分布,选取过圆形通风孔轴线的截面,在该截面热风遵循质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程^[23]。选取圆形通风孔的圆心为坐标原点,采用直角坐标系建立沥青路面对流传热方程。

质量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0,$$

式中: ρ 为热风密度, kg/m^3 ; u 、 v 和 w 分别为热风在 x 、 y 和 z 方向的速度, m/s 。

动量守恒方程为:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial \tau} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right), \end{aligned}$$

式中: τ 为时间, s ; p 为压强, Pa ; η 为动力黏度, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$; F_x 、 F_y 和 F_z 分别为体积力在 x 、 y 和 z 方向的分量, N/m^3 。

能量守恒方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right),$$

式中: c_p 为定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; T 为热风的热力学温度, K 。

2.2 定解条件及区域离散化

沥青路面热风循环加热问题的定解条件主要包括 Dirichlet 条件和 Neumann 条件;Dirichlet 条件指边界的温度 t_w 为常量;Neumann 条件是边界的流密度 q_w 为常量。

对求解区域划分网格,节点坐标为 (m, n) ,两节点间距为步长, x 、 y 方向的步长分别记作 Δx 和 Δy ,如图 3 所示。每个节点可视为以其为中心形成的正方形区域代表,图 3 中的阴影区域是节点 (m, n) 所代表的区域,称为控制容积^[3]。

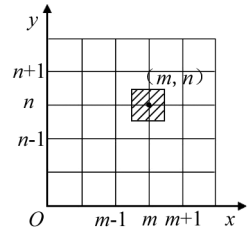


图 3 求解区域的划分

2.3 建立节点离散方程

采用有限差分法和泰勒级数展开法^[24],根据节点 (m, n) 处的温度 $T_{m,n}$ 计算节点 $(m+1, n)$ 和 $(m-1, n)$ 处的温度 $T_{m+1,n}$ 和 $T_{m-1,n}$,分别为:

$$T_{m+1,n} = T_{m,n} + \Delta x \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m,n} + \frac{\Delta x^2}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{m,n} + \frac{\Delta x^3}{6} \frac{\partial^3 T}{\partial x^3} \Big|_{m,n} + \frac{\Delta x^4}{24} \frac{\partial^4 T}{\partial x^4} \Big|_{m,n} + \cdots + \frac{\Delta x^n}{n!} \frac{\partial^n T}{\partial x^n} \Big|_{m,n}, \quad (1)$$

$$T_{m-1,n} = T_{m,n} - \Delta x \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m,n} + \frac{\Delta x^2}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{m,n} - \frac{\Delta x^3}{6} \frac{\partial^3 T}{\partial x^3} \Big|_{m,n} + \frac{\Delta x^4}{24} \frac{\partial^4 T}{\partial x^4} \Big|_{m,n} + \cdots + (-1)^n \frac{\Delta x^n}{n!} \frac{\partial^n T}{\partial x^n} \Big|_{m,n}. \quad (2)$$

联立式(1)(2),对 x 求二阶偏导为:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{m,n} = \frac{T_{m+1,n} - 2T_{m,n} + T_{m-1,n}}{\Delta x^2} + O(\Delta x^2), \quad (3)$$

式中 $O(\Delta x^2)$ 为 x 方向的二阶截断误差。

根据节点 (m, n) 处的温度 $T_{m,n}$ 计算节点 $(m, n+1)$ 和 $(m, n-1)$ 处的温度 $T_{m,n+1}$ 和 $T_{m,n-1}$,分别为:

$$T_{m,n+1} = T_{m,n} + \Delta y \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{m,n} + \frac{\Delta y^2}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \Big|_{m,n} + \frac{\Delta y^3}{6} \frac{\partial^3 T}{\partial y^3} \Big|_{m,n} + \frac{\Delta y^4}{24} \frac{\partial^4 T}{\partial y^4} \Big|_{m,n} + \cdots + \frac{\Delta y^n}{n!} \frac{\partial^n T}{\partial y^n} \Big|_{m,n}, \quad (4)$$

$$T_{m,n-1} = T_{m,n} - \Delta y \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{m,n} + \frac{\Delta y^2}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \Big|_{m,n} - \frac{\Delta y^3}{6} \frac{\partial^3 T}{\partial y^3} \Big|_{m,n} + \frac{\Delta y^4}{24} \frac{\partial^4 T}{\partial y^4} \Big|_{m,n} + \cdots + (-1)^n \frac{\Delta y^n}{n!} \frac{\partial^n T}{\partial y^n} \Big|_{m,n}. \quad (5)$$

联立式(4)(5),对 y 求二阶偏导为:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \Big|_{m,n} = \frac{T_{m,n+1} - 2T_{m,n} + T_{m,n-1}}{\Delta y^2} + O(\Delta y^2), \quad (6)$$

式中 $O(\Delta y^2)$ 为 y 方向的二阶截断误差。

联立式(3)(6),忽略二阶截断误差 $O(\Delta x^2)$ 、 $O(\Delta y^2)$,节点 (m,n) 处温度的离散方程为:

$$\frac{T_{m+1,n} - 2T_{m,n} + T_{m-1,n}}{\Delta x^2} + \frac{T_{m,n+1} - 2T_{m,n} + T_{m,n-1}}{\Delta y^2} = 0。$$

3 建立仿真模型

3.1 三维模型及网格划分

采用 FLUENT 中的模块 spaceClaim 对热风循环加热机的热风加热腔及沥青路面进行三维建模,为便于分析和计算,对其结构合理简化,按实际尺寸设计三维模型中热风加热腔关键结构,如图 4 所示。

采用 FLUENT 中的模块 mesh 对热风加热腔及沥青路面进行网格划分,结果如图 5 所示。采用节点共享处理流体域和固体域的接触面,保证接触面热流密度的连续性,采用四面体划分网格流体域,六面体划分网格固体域。在接触面上设置 5 层边界层,靠近流体域的第 1 层边界层厚 10 mm,第 2~5 层边界层厚度依次比前一层增大 10%。设置流体域和固体域的单元边长为 50 mm,共划分为 378 357 个网格节点,1 638 515 个网格单元。

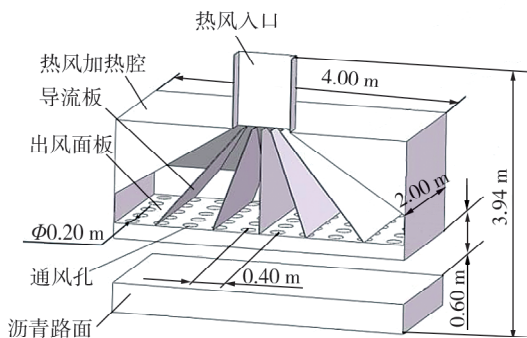


图 4 热风加热腔及沥青路面三维模型

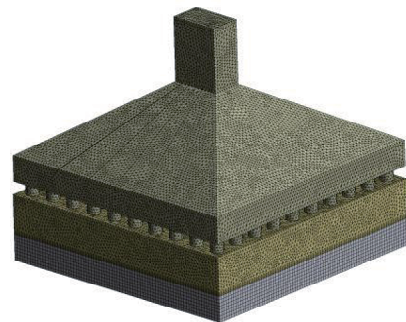


图 5 热风加热腔及沥青路面网格划分

3.2 沥青路面的热物性参数

沥青路面分为面层、基层和底基层,其中面层结构由上面层、中面层和下面层组成,各面层结构的沥青混合料热物性参数如表 1 所示。

表 1 各面层结构的沥青混合料的热物性参数

面层结构	面层类型	导热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	热扩散率/($10^{-7} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
上面层	AC-13	1.3	2 350	960	5.67
中面层	AC-20	1.4	2 400	900	6.48
下面层	AC-25	1.1	2 250	800	6.11

3.3 设置边界条件和相关参数

在 FLUENT 中设置热风入口速度为 8 m/s,热风温度为 923.15 K,沥青路面的温度为 313.15 K,导热系数为 $1.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,密度为 $2\,350 \text{ kg}/\text{m}^3$,比热容为 $960 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,耦合面传热系数为 $16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,热生成率为 $858 \text{ kW}/\text{m}^3$,回风进口速度为 16 m/s,进口温度为 473.15 K,压力速度耦合方案为 Coupled 类

型。热风循环加热过程中对流和耗散对热风湍流影响较大,建立 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型微分方程(k 为湍流动能, J; ε 为湍流耗散率, %), 能较好模拟射流冲击耦合传热过程。Realizable $k-\varepsilon$ 模型的湍动能方程^[25]为:

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\eta + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M,$$

式中: η 为动力黏度, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$; x_i 为空间坐标分量; G_k 为热风平均速度梯度产生的湍动能, J; G_b 为热风平均浮力产生的湍动能, J; Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影响因子; μ_t 为湍流黏性系数, $\mu_t = 0.09; \sigma_k$ 为常数, $\sigma_k = 1.0$ 。

耗散率输送方程^[25]为:

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\eta + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_{1\varepsilon} \varepsilon S - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} C_{3\varepsilon} G_b \frac{\varepsilon}{k},$$

式中: ν 为运动黏度, m^2/s ; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为常数, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_{3\varepsilon} = 0.09$; σ_ε 为常数, $\sigma_\varepsilon = 1.2$; S 为应变率, s^{-1} 。

4 仿真结果的分析

对加热后的沥青路面进行铣刨工作。热风加热铣刨机的铣刨深度通常为 4 cm, 因此需对距沥青路面表面 4 cm 内的沥青混合料进行就地热再生, 沥青路面表层平均温度达到 453.15 K 时, 距沥青路面表面 4 cm 处平均温度可达 363.15 K, 达到铣刨要求^[26-28]。以距沥青路面表面 4 cm 处平均温度达到 363.15 K 时所用加热时间判断加热效率, 加热时间越长, 加热效率越低。

设计 5 个导流板, 为保证热风加热腔入口处热风的质量流率平均分配, 采用等距排列导流板上方位, 设置导流板外侧倾斜角度 φ 分别为 30° 、 35° 、 40° 、 45° 、 50° , 内侧倾斜角度 θ 分别为 45° 、 50° 、 55° 、 60° 、 65° 、 70° , 采用正交试验设计法, 制定 30 组试验方案, 如表 2 所示。计算距沥青路面表面 4 cm 处平均温度达到 363.15 K 时所用加热时间, 确定最优内、外侧导流板的倾斜角度, 提高热风循环加热沥青路面的加热效率。

表 2 正交试验设计方案

方案	$\varphi/(^\circ)$	$\theta/(^\circ)$	方案	$\varphi/(^\circ)$	$\theta/(^\circ)$	方案	$\varphi/(^\circ)$	$\theta/(^\circ)$	方案	$\varphi/(^\circ)$	$\theta/(^\circ)$	方案	$\varphi/(^\circ)$	$\theta/(^\circ)$
1	30	45	7	35	45	13	40	45	19	45	45	25	50	45
2	30	50	8	35	50	14	40	50	20	45	50	26	50	50
3	30	55	9	35	55	15	40	55	21	45	55	27	50	55
4	30	60	10	35	60	16	40	60	22	45	60	28	50	60
5	30	65	11	35	65	17	40	65	23	45	65	29	50	65
6	30	70	12	35	70	18	40	70	24	45	70	30	50	70

4.1 热风射流冲击传热流场分析

在 FLUENT 中建立沥青路面热风射流冲击传热模型, 选取热风温度为 923.15 K, 热风速度为 8 m/s, 沥青路面初始温度为 313.15 K, 出风面板通风孔直径为 0.20 m, 仿真模拟得到热风射流加热沥青路面铅垂切面的速度矢量分布如图 6 所示, 温度场分布如图 7 所示。

由图 6 可知: 热风对沥青路面射流冲击传热时, 速度矢量分布明显对称, 存在射流冲击流动的 3 个主要流动区域, 分别为自由射流区、滞止区和壁面射流区。自由射流区的热流速度较大, 可竖直吹向沥青路面表面, 热风到达路面后, 相邻通风孔间的相互影响产生上喷流动区, 该区域会产生旋涡流动, 流体产生小范围再循环。

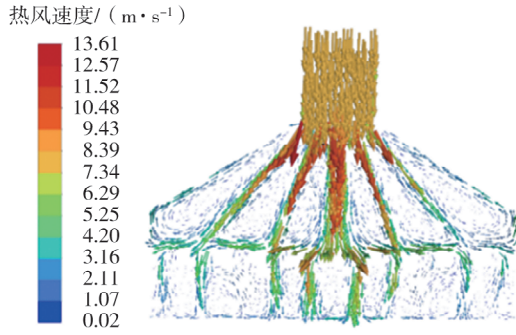


图6 热风射流加热沥青路面铅垂切面速度矢量分布

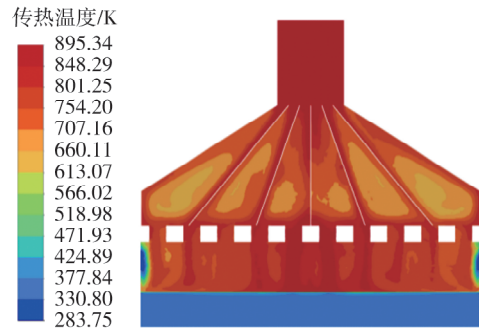


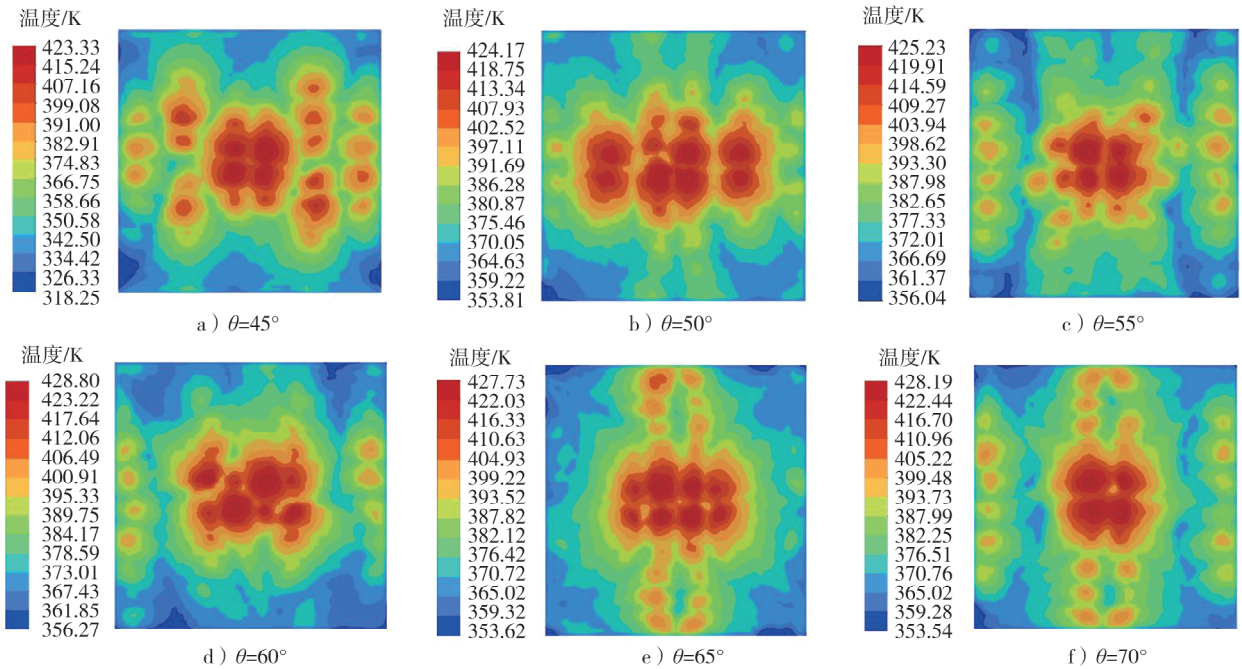
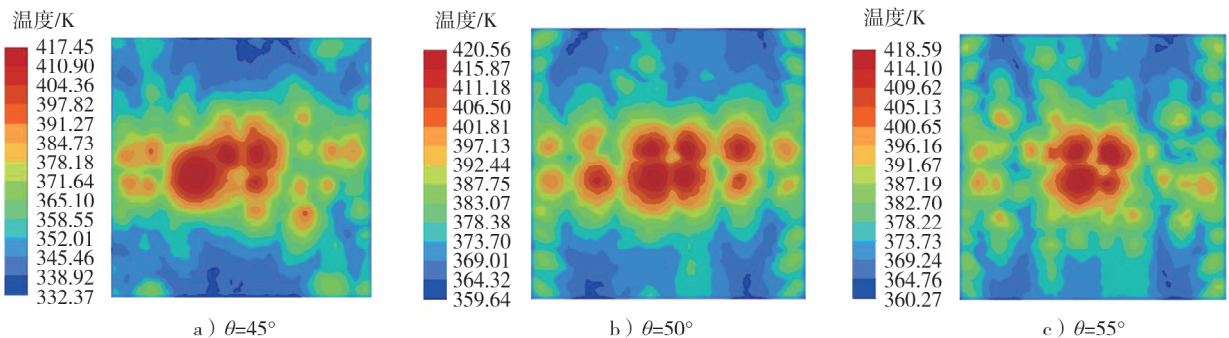
图7 热风射流加热沥青路面铅垂切面温度场分布云图

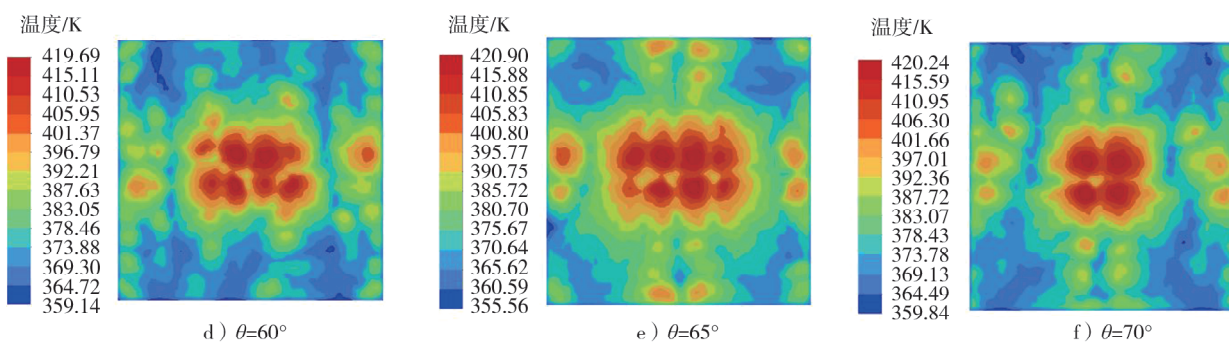
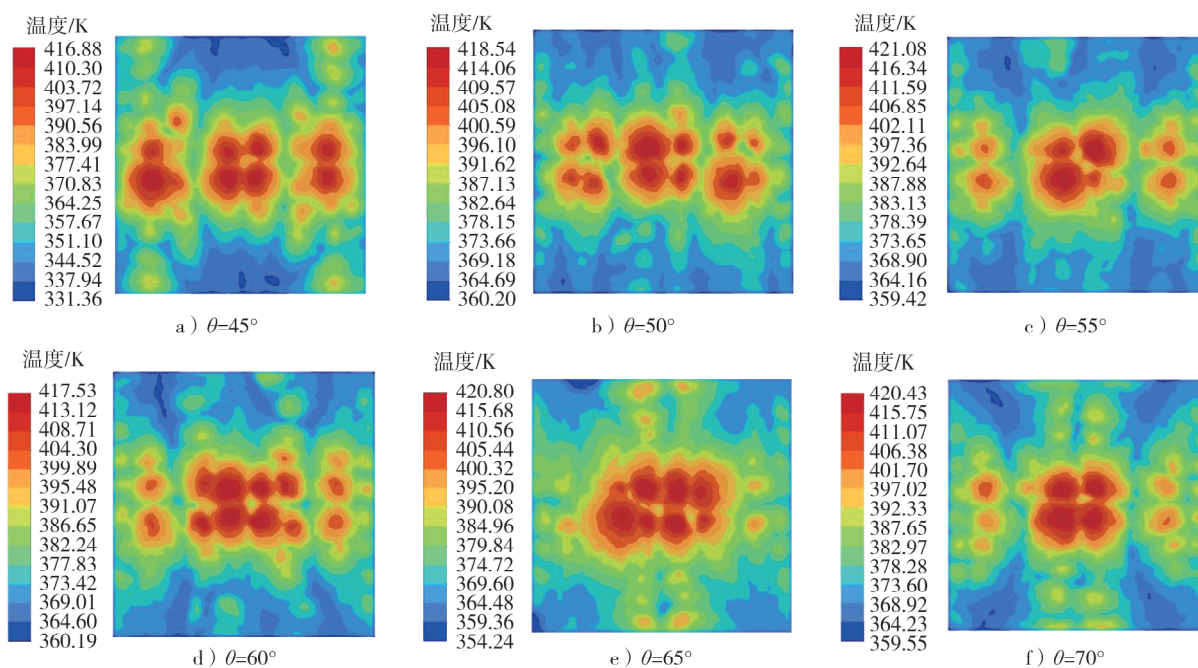
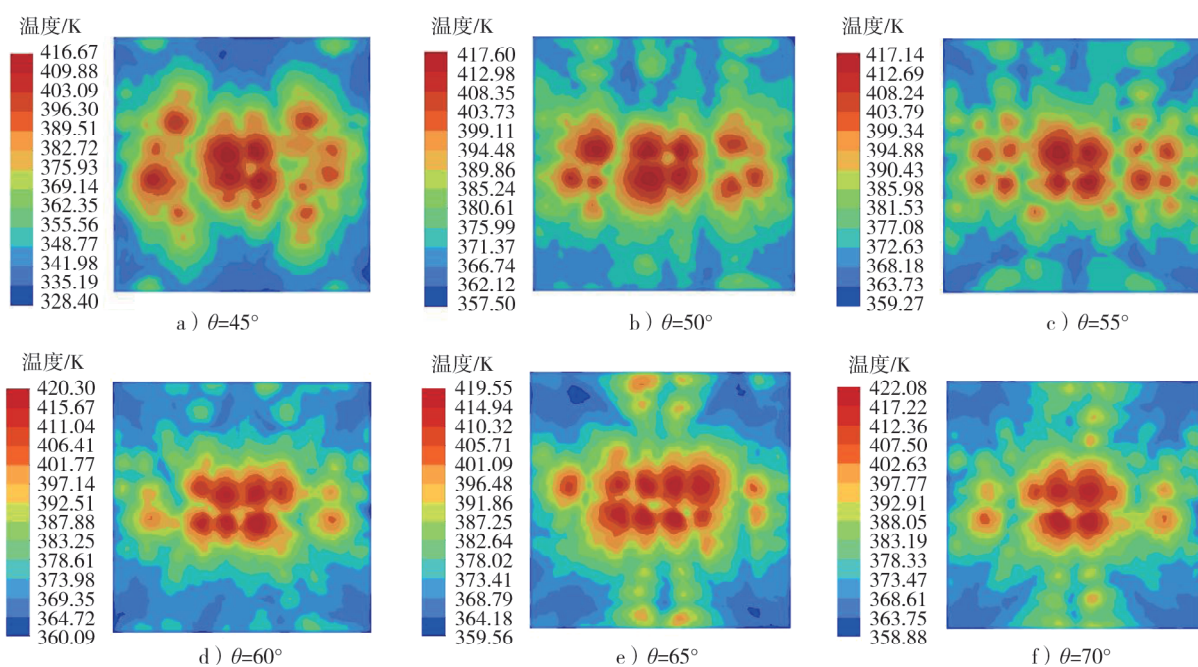
由图7可知:热风从通风孔射流冲击加热沥青路面的温度场分布明显对称,与速度场分布相似,在沥青路面表层形成较薄的边界层。热风加热腔中间位置的热风竖直向下吹向沥青路面,中间位置温度最高,向两侧温度逐渐降低;位于通风孔位置的沥青路面温度较高,沿径向向外温度递减,且该位置的热量沿垂直方向传递最快。

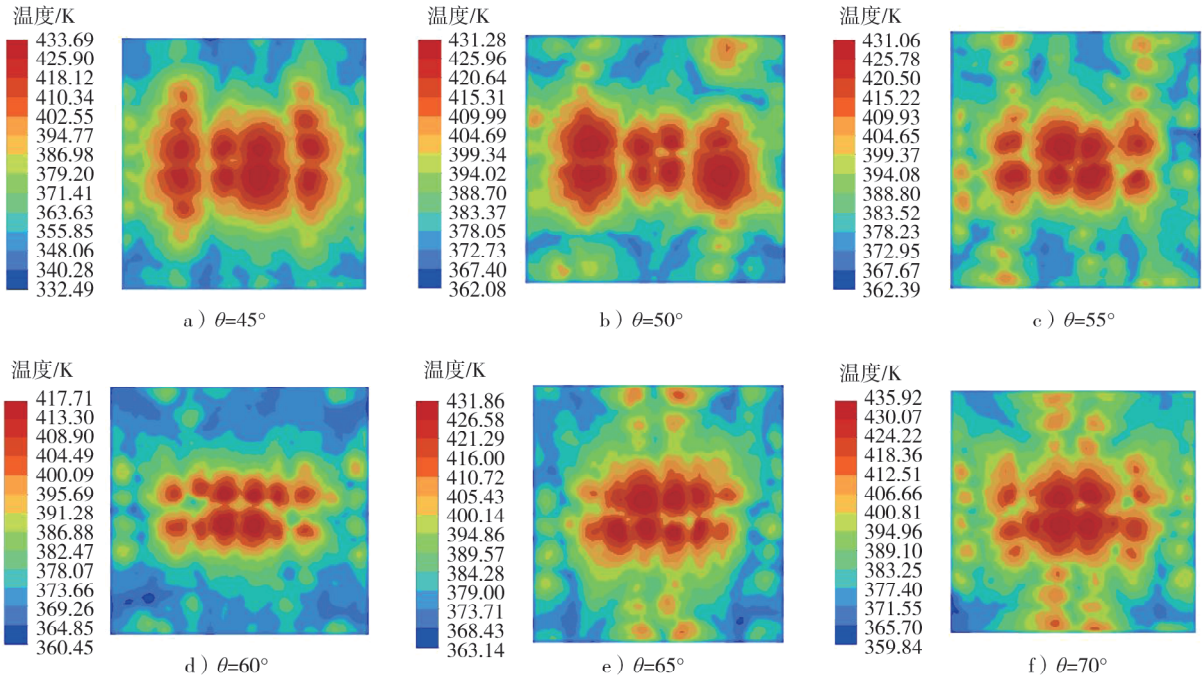
综上可知,热风循环加热沥青路面的速度场和温度场分布基本符合射流冲击传热的理论规律^[4]。

4.2 不同内、外侧导流板倾斜角度对加热效率的影响

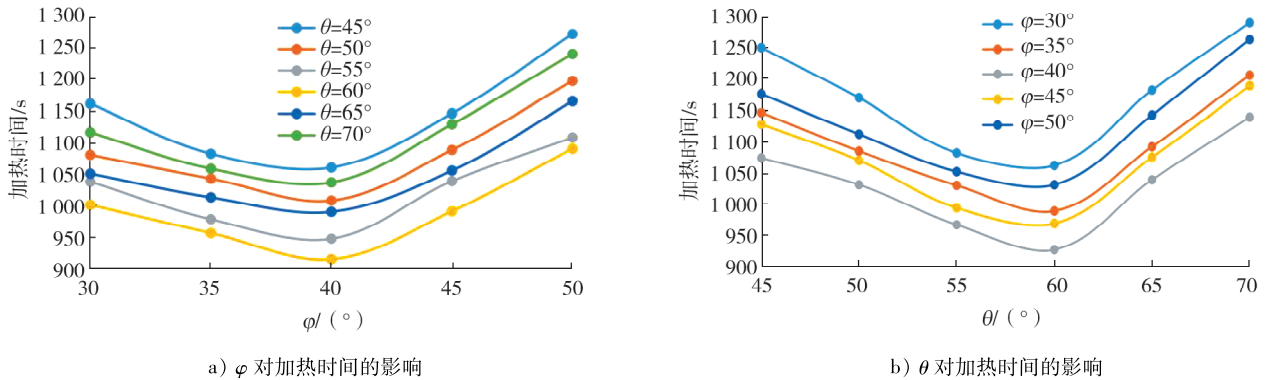
导流板外侧倾斜角度 φ 分别为 30° 、 35° 、 40° 、 45° 、 50° 时,不同内侧倾斜角度 θ 下,距沥青路面表面4 cm处平均温度达到363.15 K时,其温度场分布云图如图8~12所示。

图8 $\varphi = 30^\circ$ 时距沥青路面表面4 cm处温度场分布云图

图 9 $\varphi = 35^\circ$ 时距沥青路面表面 4 cm 处温度场分布云图图 10 $\varphi = 40^\circ$ 时距沥青路面表面 4 cm 处温度场分布云图图 11 $\varphi = 45^\circ$ 时距沥青路面表面 4 cm 处温度场分布云图

图12 $\varphi=50^\circ$ 时距沥青路面表面4 cm处温度场分布云图

根据仿真试验结果,统计图8~12中平均温度、加热时间等数据,得到距沥青路面表面4 cm处平均温度达到363.15 K时所用加热时间与不同 φ 、 θ 的关系,如图13所示。

图13 不同 φ 、 θ 对加热时间的影响

由图13可知:内、外侧导流板倾斜角度分别不变时,随外、内侧导流板的倾斜角度增大,距沥青路面表面4 cm处的平均温度达到363.15 K所用加热时间均先减小后增大。导流板内、外侧倾斜角度分别为 60° 和 40° 时,所用加热时间较短,热风循环加热沥青路面的加热效率较高。

5 结论

以沥青路面热风循环加热机中导流板为研究对象,采用有限差分法和泰勒级数展开法,对沥青路面射流冲击传热问题进行数值模拟求解,建立沥青路面射流冲击耦合传热模型,采用FLUENT仿真分析不同导流板内、外侧倾斜角度对加热效率的影响,提高沥青路面热风循环加热效率。

1) 基于流体力学和传热学理论知识,分析热风循环加热沥青路面的基本原理和传热过程,建立沥青路面射流冲击耦合传热的数学模型和三维模型。

2)建立射流冲击传热数学模型,采用正交试验设计法制定试验方案,通过仿真试验得到不同导流板内、外侧倾斜角度下沥青路面的温度场分布,以及不同导流板内、外侧倾斜角度对距沥青路面表面4 cm处平均温度加热到363.15 K所用时间的影响关系,确定最优导流板内、外侧倾斜角度。

3)当内、外侧导流板倾斜角度分别不变时,加热效率随外、内侧导流板倾斜角度的增大均先减小后增大。当导流板内、外侧倾斜角度分别为 60° 和 40° 时,距沥青路面表面4 cm处平均温度达到363.15 K所用加热时间较短,热风循环加热沥青路面的加热效率较高,施工成本降低,可为热风循环加热机导流板设计提供试验依据。

参考文献:

- [1] 交通运输部. 2023年交通运输行业发展统计公报[N]. 中国交通报, 2024-06-18(002).
- [2] 交通运输部公路局, 中交第一公路勘察设计研究院有限公司. 公路工程技术标准: JTG B01—2014[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [3] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [4] 张靖周. 高等传热学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2015.
- [5] 孙文策, 刘宏升. 工程流体力学[M]. 6版. 大连: 大连理工大学出版社, 2022.
- [6] 侯雷鸣. 就地热再生沥青路面往复加热研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
- [7] PARK Tae Seon, SUNG Hyung Jin. Development of a near-wall turbulence model and application to jet impingement heat transfer[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2001, 22(1): 10-18.
- [8] GU H R, XU X X, XIAO R, et al. Multi-stage heating technology for asphalt pavement hot in-place recycling using controlled heating power[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2023, 24(1): 1-11.
- [9] XIAO R, HOU L M, GU H R. Study on the interaction of hot air heating parameters for asphalt pavement based on the response surface method[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 47(7): 1-17.
- [10] 肖茹. 沥青路面热风加热效率与温度场预测研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
- [11] 张江勇, 顾海荣, 肖茹. 新型热风循环加热装置燃烧及流动传热数值模拟研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2019, 36(12): 81-84.
- [12] 徐信芯, 张辉, 姜鑫, 等. 基于多喷嘴热风循环加热沥青路面的变加热分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(3): 1220-1225.
- [13] 徐信芯, 郑江溢, 张陈, 等. 热风加热沥青路面的湍流共轭传热与温度场预测[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53(4): 637-646.
- [14] 刘文佳. 沥青路面热风加热仿真与试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [15] 薛超飞. 小单元加热墙沥青路面加热均匀性研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [16] 顾海荣, 董强柱, 梁奉典, 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): 170-176.
- [17] 张德育, 黄晓明; 马涛, 等. 沥青路面就地热再生加热温度场模拟分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(6): 1282-1287.
- [18] 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): 1290-1296.
- [19] 李雪毅. 就地热风再生沥青路面温度场数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [20] 燕铎, 张江勇, 成九瑞, 等. 热风加热机加热墙的热风循环装置的改进[J]. 工程机械与维修, 2020(4): 28-29.
- [21] 姚婷婷. 沥青路面就地热再生性能影响关键因素研究[J]. 山西交通科技, 2023(5): 17-20.
- [22] 兰建丽. 沥青路面材料再生工艺优化及热风加热技术的应用[J]. 山西交通科技, 2021(1): 4-6.
- [23] 夏悠杨. 沥青路面再生热风循环加热机理及设备关键结构改进研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2020.
- [24] 李雪毅, 邹晓翎, 吁新华. 热风循环式就地热再生沥青路面温度场[J]. 中外公路, 2018, 38(2): 69-74.
- [25] 裴志明. 热风加热机多单元分区加热研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
- [26] 刘文佳. 沥青路面热风加热仿真与试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [27] 董聪. 沥青路面加热过程和加热工艺仿真研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [27] 周明旭. 基于清洁化视角的国省干线沥青路面就地热再生技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.

Optimization of deflector plate structure parameters for hot air circulation heating machine of asphalt pavement

LIU Zeyuan¹, ZHANG Hongli^{1*}, ZHANG Qingmei², WANG Yiqing¹

1. School of Engineering Machinery, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China; 2. Road Engineering Technology and Equipment Research Institute, Jiangsu Industrial Technology Research Institute, Xuzhou 221004, China

Abstract: In order to improve the efficiency of hot air circulation heating for asphalt pavement, this study focuses on the deflector plate in hot air circulation heating machines. Using finite difference method and Taylor series expansion, a numerical solution for jet impingement heat transfer is developed, a fluid-solid coupling heat transfer model for asphalt pavement is established. Finite element software FLUENT is employed to simulate and analyze the heat transfer field of hot air jet impingement, investigate the influence of inner inclination angles (45° , 50° , 55° , 60° , 65° , 70°) and outer inclination angles (30° , 35° , 40° , 45° , 50°) of the deflector plate on heating efficiency. Orthogonal experimental design is used to design 30 sets of experimental schemes. Temperature field distributions of asphalt pavement under different inner and outer inclination angles are obtained. The hot air circulation heating duration for specific temperature targets is calculated and the structural parameters of the deflector plate in hot air circulation heating machines are determined. Results show that when the inner or outer deflector plate inclination angle remains constant, heating efficiency first decreases and then increases as the outer or inner deflector plate inclination angle increase. The higher heating efficiency of hot air circulation heating asphalt pavement is achieved when the inner and outer deflector plate inclination angles are 60° and 40° respectively.

Keywords: hot air circulation heating; deflector plate; inclination angle; fluid-structure coupling; heating efficiency

(责任编辑:边文超)

(上接第 89 页)

efficiency in traffic cone retractable device, a new design of traffic cone retractable device and optimization of key components are proposed. The finite element analysis software ANSYS Workbench is used to optimize the design of the integrated framework, which accounts for the largest proportion of mass in the traffic cone retractable device. Static analysis is performed on the integrated framework under extreme working conditions. Based on the optimal space-filling design method, the experimental design is carried out, and the response surface fitting is carried out by genetic aggregation method. The design point, goodness of fit and related sensitivity diagram are obtained, and the influence of structural size parameters on geometric quality, total deformation and equivalent stress is revealed. The multi-objective genetic algorithm NSGA-II is employed for optimization to obtain the best optimization scheme. The results show that compared with the original model, the optimized model reduces mass by 30.6% while meeting the requirements for material yield strength and structural stiffness design.

Keywords: traffic cone retractable device; integrated framework; static analysis; response surface fitting; multi-objective genetic algorithm NSGA-II

(责任编辑:边文超)