

# 加热滚筒参数对沥青混合料加热效率影响的仿真分析

李 旋<sup>1</sup>, 马登成<sup>1,2</sup>, 杨士敏<sup>1</sup>

(1. 长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 徐州工程机械集团有限公司 道路机械事业部, 江苏 徐州 221006)

**摘 要:** 为了提高沥青混合料的加热效率, 降低能源消耗, 建立沥青混合料加热滚筒三维分析模型, 基于传热学原理和流体力学原理, 采用有限容积法对沥青混合料的加热过程进行数值模拟。得到了沥青混合料温度场分布以及混合料的温度变化曲线, 并分析了沥青路面养护车加热滚筒结构参数和滚筒转速对沥青混合料加热时间的影响。研究表明: 螺旋叶片高度、螺旋叶片螺旋角对沥青混合料的加热效率有一定的影响, 合理的叶片结构可以更好地促进冷热沥青混合料之间的混合传热, 提高加热效率; 加热滚筒转速对沥青混合料的加热效率影响较大, 转速过慢混合料混合传热不均匀, 转速过快滚筒壁面温度较低, 混合料温升较慢。

**关键词:** 机械工程; 加热滚筒参数; 沥青混合料; 温度场; 数值模拟

**中图分类号:** U415.52

**文献标志码:** A

## Simulation analysis on the influence of heating roller parameters on asphalt mixture heating efficiency

LI Xuan<sup>1</sup>, MA Deng-cheng<sup>1,2</sup>, YANG Shi-min<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of Ministry of Education,

Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Road Machinery Business Department,

Xuzhou Construction Machinery Group Co. Ltd Xuzhou 221006, Jiangsu, China)

**Abstract:** To improve the heating efficiency of asphalt mixture and reduce energy consumption, the 3D analysis model of asphalt mixture heating roller was established. Based on the principles of heat transfer and fluid mechanics, the finite volume method was used to simulate the heating process of asphalt mixture. The distribution of temperature field and temperature curves of asphalt mixture were obtained. The influence of heating roller parameters and the different roller speeds of asphalt road maintainer on heating time of asphalt mixture was analyzed. The results show that the height and helix angle of blade has certain influence on the heating efficiency of asphalt efficiency. Reasonable blade structure can improve heat transfer between hot and cold asphalt mixture and improve heating efficiency. Roller speed has considerable influence on heating

收稿日期: 2015-10-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(11202036); 高速公路施工机械陕西省重点实验室开放基金项目(2013G1502059); 陕西省自然科学基金项目(2012JQ1008)

作者简介: 李 旋(1988-), 男, 浙江建德人, 工学博士研究生, E-mail: lixuan\_781@163.com。

efficiency of asphalt mixture. Heat transfer of mixture is uneven under the low roller speed. Temperature of asphalt mixture rises slowly because of the lower roller wall temperature under the high roller speed. 4 tabs, 10 figs, 23 refs.

**Key words:** mechanical engineering; heating roller parameter; asphalt mixture; temperature field; numerical simulation

0 引 言

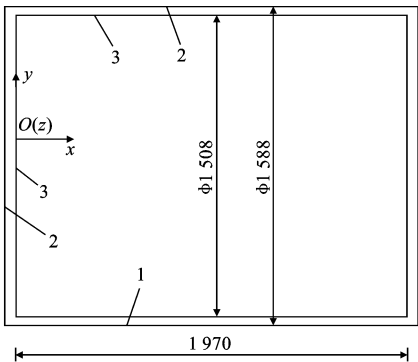
沥青混合料加热是沥青路面新建或维修工程必不可少的一道工艺,以前人们一般采用导热油加热法、火管加热法对沥青混合料进行加热<sup>[1]</sup>。采用导热油加热法或火管加热法将 2 t 沥青混合料加热至施工所要求的温度需要 6~8 h,且在加热过程中易导致局部沥青混合料由于温度过高而老化<sup>[2]</sup>。近年来,出现了红外滚筒加热沥青混合料的设备,采用红外线滚筒式加热,同样的混合料只需要 35 min 左右,相比前 2 种加热方式采用红外线加热滚筒式加热法可以大大缩短加热时间。加热滚筒的结构参数和工作参数是影响沥青混合料加热效率的重要因素,合理的加热滚筒参数和滚筒转速对于防止沥青混合料老化和缩短沥青混合料加热时间具有十分重要的意义<sup>[3-4]</sup>。

对于沥青混合料的加热,前人做了许多工作,凌杰等对沥青混合料热再生加热方法进行了试验研究<sup>[5-6]</sup>;朱松青等对微波加热湿旧沥青混合料进行了数值模拟和分析<sup>[7]</sup>;何兆益等通过试验研究了加热温度和时间对沥青混合料老化的影响<sup>[8]</sup>;纪小平等通过试验方法对沥青混合料的厂拌热再生和温拌热再生进行了研究<sup>[9-12]</sup>。对于沥青路面的加热较多地采用了数值模拟的方法,而对于沥青混合料的加热大多采用试验的方法,这将耗费较大的资金和人力。随着计算机技术和流体力学 CFD 软件的发展,将沥青混合料的流场和加热温度场相结合,对其进行加热分析已成为可能<sup>[13]</sup>,本文通过流体力学分析软件 FLUENT 分析加热滚筒螺旋叶片螺旋升角、叶片高度和加热滚筒转速对加热效率的影响<sup>[14-15]</sup>。

1 模型结构及模型建立

1.1 模型结构分析

整个加热滚筒结构如图 1 所示,加热滚筒结构由圆柱形红外加热板 1、保温仓 2 和加热搅拌滚筒 3 组成。保温仓尺寸见图 1,加热板为圆柱面,对应的圆心角为 100°,加热板与滚筒壁面的间距为 40 mm。加



单位: mm

图 1 加热滚筒结构

Fig. 1 Heating roller structure

热原理为加热板 1 产生高强度的红外线对滚筒外壁 3 进行加热,被加热的滚筒再将热量传递给其内部的沥青混合料,整个加热过程中,滚筒以一定的转速旋转,对沥青混合料进行搅拌,使得冷热沥青混合料不断地混合传热。

1.2 参数设定与网格划分

加热滚筒三维模型如图 2 所示,加热滚筒模型包括滚筒壁面 4 和螺旋叶片 5。为了分析不同叶片结构参数对混合料加热效率的影响,分别对不同叶片结构参数的加热状况进行数值模拟。根据现有产品的参数选择如下:采用等螺距双头螺旋叶片,螺旋角分别取 65°、67°、68°和 69°,叶片高度分别取 250、300 和 350 mm。加热滚筒基本参数:滚筒直径 1 508 mm,长度 1 970 mm。

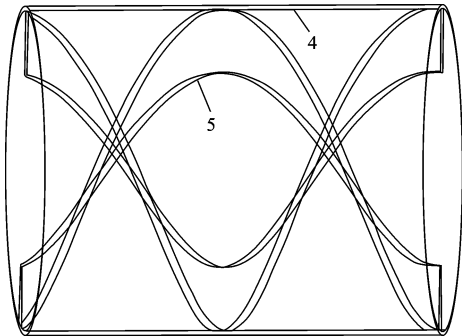


图 2 滚筒三维模型透视

Fig. 2 Perspective 3D model of roller

对沥青混合料的加热模型进行网格划分,对靠近壁面的网格进行细化处理,为保证网格划分质量,叶片厚度取 40 mm。加热滚筒内部沥青混合料流场模型如图 3 所示,保温层网格 1 和加热板网格 2 模型如图 4 所示。

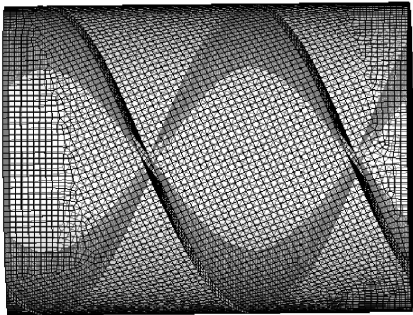


图 3 加热滚筒网格模型  
Fig. 3 Mesh model of heating roller

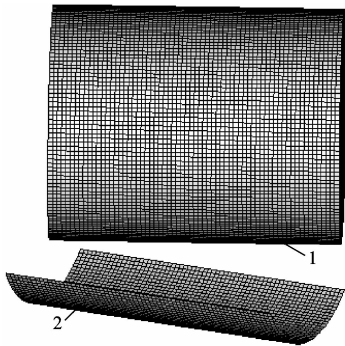


图 4 保温层和加热板网格模型  
Fig. 4 Mesh model of insulating layer and heating plate

2 边界条件及数值模拟

求解过程中,根据沥青混合料加热过程的实际工况,提出以下假设:

- (1)认为沥青混合料是动力粘度随温度变化的非牛顿流体;
- (2)忽略温度变化对沥青混合料密度、比热容和导热系数的影响,将这些参数定义为常数;
- (3)将流道壁面定义为无滑移边界条件;
- (4)模型中未建立保温仓之外的大气模型,忽略保温仓与外界大气的热交换。

混合料热物参数设置<sup>[16]</sup>:密度为 2 450 kg/m<sup>3</sup>,比热容为 1 680 J/(kg · °C),导热系数为 3.05 W/(m · k)。沥青混合料的粘度受温度变化影响较大,利用分段线性函数来确定沥青混合料的粘度。当沥青混合料在常温时,颗粒之间的粘力很小,把混合料假设为非

牛顿流体进行研究时,混合料在常温下的粘度系数不宜过大,不同温度下沥青混合料的粘度如表 1 所示<sup>[17]</sup>。

表 1 不同温度下沥青混合料的粘度  
Tab. 1 Viscosities of asphalt mixture at different temperatures

温度/℃	粘度/(Pa · s)
27	2.32
105	1.94
120	1.15
130	0.72
140	0.53
160	0.20
170	0.10

其他参数设定:混合料质量 2.1 t,混合料初始温度 27 °C,滚筒内是沥青混合料和空气的多相流;空气相的吸收系数 0.4,空气密度 1.225 kg/m<sup>3</sup>,空气比热容 1 006.43 J/(kg · °C)<sup>[18]</sup>,空气导热系数 0.024 2 W/(m · K);加热板为恒温壁面,温度为 800 °C,加热板壁面厚度为 10 mm,滚筒壁面厚度为 8 mm,当研究滚筒叶片参数对混合料加热效率的影响时,加热滚筒的转速统一取 5 r/min,加热板和保温仓静止不动。

仿真模型的选择:滚筒内有沥青混合料和空气,选取混合模型,沥青混合料在滚筒内的流动是湍流,选取标准  $k-\epsilon$  双方程模型<sup>[19-20]</sup>,滚筒以一定的速度旋转,选取滑移网格模型;沥青混合料和滚筒之间以热传导为主,沥青混合料之间的传热方式包含热对流和热传导;加热板和滚筒壁面之间主要以辐射传热为主,采用  $P_1$  辐射模型。

沥青混合料混合模型的能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n [\alpha_k \bar{v}_k (\rho_k E_k + p)] = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + S_E \tag{1}$$

式中: $t$  为时间; $\alpha_k$  为第  $k$  相体积分数; $\rho_k$  为第  $k$  相密度; $E_k$  为第  $k$  相所包含的能量; $\bar{v}_k$  为第  $k$  相速度; $p$  为流体微元体上的静压; $k_{\text{eff}}$  为有效热传导率; $T$  为温度; $S_E$  为所有的体积热源。

在位置  $\mathbf{r}$ 、沿  $s$  的辐射传热方程为

$$\frac{dI(\mathbf{r},s)}{ds_1} + (a + \sigma_s) I(\mathbf{r},s) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\mathbf{r},s') \Phi(s,s') d\Omega' \tag{2}$$

式中: $r$  为位置向量;  $s$  为方向向量;  $s'$  为散射方向矢量;  $s_1$  为沿程长度;  $a$  为吸收系数;  $n$  为折射系数;  $\sigma_s$  为散射系数;  $\sigma$  为斯蒂芬-玻耳兹曼常数;  $I$  为辐射强度;  $T$  为温度;  $\Phi$  为相位函数;  $\Omega'$  为空间立体角。

以图 3 和图 4 作为计算网格模型,利用流体力学软件 FLUENT 对红外滚筒加热沥青混合料的过程进行数值模拟,以探讨不同叶片螺旋角、不同叶片高度以及不同滚筒转速对沥青混合料加热效率的影响<sup>[21-23]</sup>。

### 3 仿真结果分析

#### 3.1 螺旋叶片角度对混合料加热效率的影响

在对沥青混合料加热进行数值模拟时,监测沥青混合料温度场的最低温度,当混合料的最低温度达到 160 ℃时,停止模拟。为了研究混合料的加热效率,对加热终了时混合料最低温度所在点的温度变化进行监测,得到该点混合料的温度变化曲线。图 5 为加热过程中不同螺旋角螺旋叶片滚筒内沥青混合料的温度变化曲线。沥青混合料加热时间具体数据见表 2。

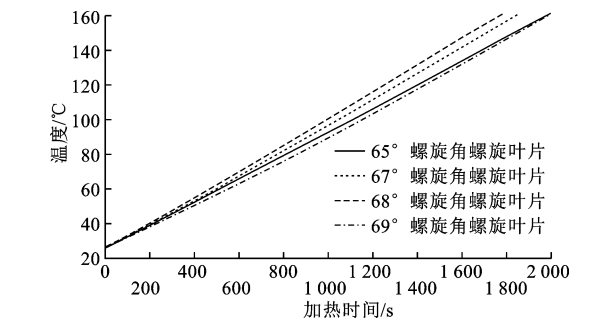


图 5 不同螺旋叶片滚筒内沥青混合料温度变化曲线  
Fig. 5 Temperature curves of asphalt mixture in roller of different blades

表 2 不同螺旋叶片沥青混合料加热时间  
Tab. 2 Heating time of asphalt mixture of different blades

叶片螺旋角/(°)	加热温度/℃	加热时间/s
65	160	1 920
67	160	1 790
68	160	1 710
69	160	1 920

根据图 5 和表 2 可以看出,随着螺旋叶片螺旋角的逐渐增加,混合料的加热效率先升高后降低。在其他参数不变的情况下,加热滚筒螺旋叶片螺旋角为 68°时能更好地促进冷热沥青混合料之间的混合传热,混合料加热时间最短。这是因为叶片螺旋

角越小,叶片螺距越大,混合料的轴向运动更明显,混合料在一侧堆积更多,不利于混合料的传热,混合料的加热效率相对更低;当叶片的螺旋角太大时,沥青混合料提升的高度减小,底部温度较高的混合料不易翻转至表面上来,导致冷热沥青混合料之间的混合传热效率降低,因此叶片螺旋角太大时,沥青混合料的加热效率也不高。

#### 3.2 叶片高度对混合料加热效率的影响

为了研究叶片高度对沥青混合料加热效率的影响,在 68°螺旋角螺旋叶片的基础上,只改变叶片高度,即分别取叶片高度为 250、300、350 mm,滚筒工作转速为 5 r/min,其他条件保持不变,模拟结果如图 6 和表 3 所示。

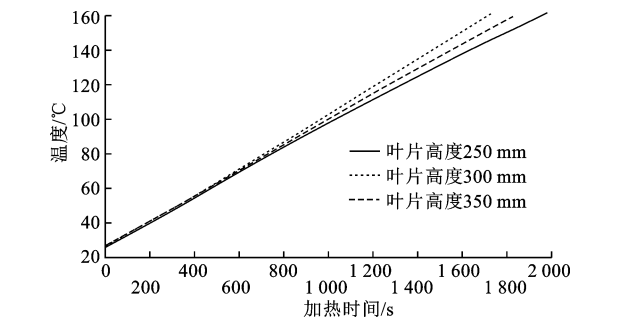


图 6 不同叶片高度的沥青混合料温度变化曲线  
Fig. 6 Temperature curves of asphalt mixture of different heights of blade

表 3 不同叶片高度的沥青混合料加热时间  
Tab. 3 Heating time of asphalt mixture of different heights of blade

叶片高度/mm	加热温度/℃	加热时间/s
250	160	1 960
300	160	1 710
350	160	1 830

从图 6 和表 3 可以得出,当叶片高度为 300 mm 时,混合料的加热时间最短。叶片高度对沥青混合料的加热效率有一定影响,叶片高度太小,对混合料的搅拌效果不明显,混合料之间的传热效率低;叶片高度太大时,大部分混合料被叶片分隔开,另外混合料有向一侧聚积的趋势,混合料的轴向混合效果不明显,因此,混合料的传热效率也会受到影响。

#### 3.3 滚筒转速对混合料加热效率的影响

为了研究滚筒转速对沥青混合料加热效率的影响,在保持螺旋叶片的螺旋角为 68°、叶片高度为 300 mm 的基础上,只改变滚筒转速,分别取滚筒转速为 3、5 和 8 r/min,其他条件保持不变,模拟结果

如图 7 和表 4 所示。

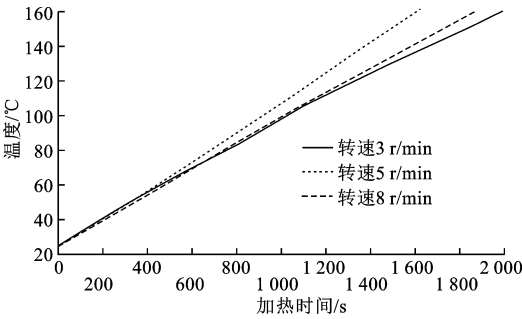


图 7 不同转速的沥青混合料温度变化曲线

Fig. 7 Temperature curves of asphalt mixture of different rotation speeds

表 4 不同转速的沥青混合料加热时间

Tab. 4 Heating time of asphalt mixture of different rotation speeds

滚筒转速/( $r \cdot \min^{-1}$ )	加热温度/°C	加热时间/s
3	160	2 110
5	160	1 710
8	160	1 980

从图 7 和表 4 可以得出,当滚筒转速为 5 r/min 时加热效率较高,转速过慢或过快都会延长沥青混合料的加热时间。当滚筒转速太低时,混合料运动非常缓慢,底部的混合料不易翻转至表面上来,冷热混合料的混合与传热效果不明显,传热效率低,加热时间长;当滚筒转速太高时,由于混合料运动速度过快,导致混合料和滚筒壁面接触时间短,且滚筒壁面温度相对较低,这些都会降低滚筒壁面与混合料之间的传热效率,靠近壁面的沥青混合料温度提升相对较慢,从而影响了混合料的加热速度。

为了进一步分析滚筒转速对沥青混合料加热效果的影响,选取沥青混合料加热模型中  $z=0$  即  $xOy$  截面作为研究对象,分析加热终了时滚筒内部沥青混合料的温度场分布情况。

图 8~图 10 分别为不同滚筒转速下,沥青混合料加热至所要求的 160 °C 时混合料的温度场分布。根据图 8~图 10 可以得出,当滚筒转速较低时,混合料的加热均匀性较差,滚筒在高转速下混合料温度分布较为均匀,随着滚筒转速的提高,混合料加热均匀性明显改善;当滚筒转速达到 5 r/min 后,进一步增大滚筒转速,混合料的加热均匀性继续改善,但效果不明显。这是因为当滚筒转速较低时,滚筒壁面在加热板的红外辐射区域停留时间较长,该区域的滚筒壁面温度更高,滚筒底部的混合料温度升高

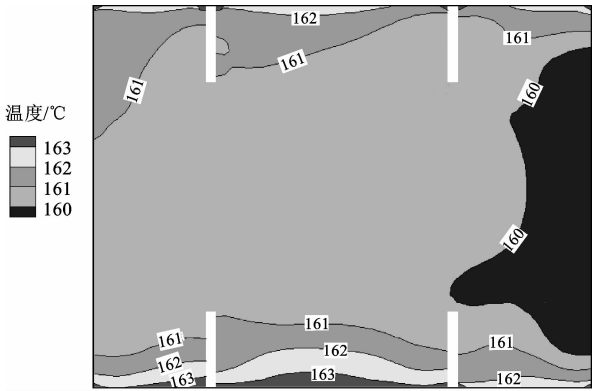


图 8 滚筒转速为 3 r/min 混合料温度场分布

Fig. 8 Temperature field of asphalt mixture at roller speed 3 r/min

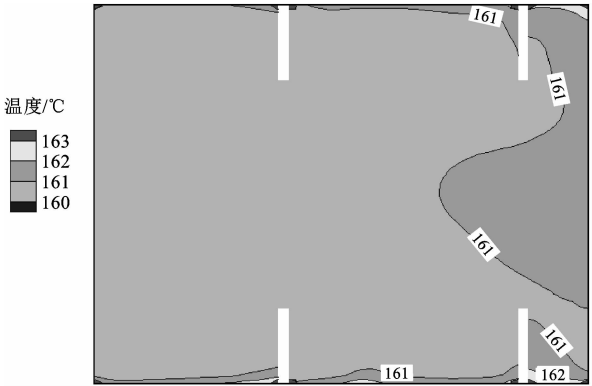


图 9 滚筒转速为 5 r/min 混合料温度场分布

Fig. 9 Temperature field of asphalt mixture at roller speed 5 r/min

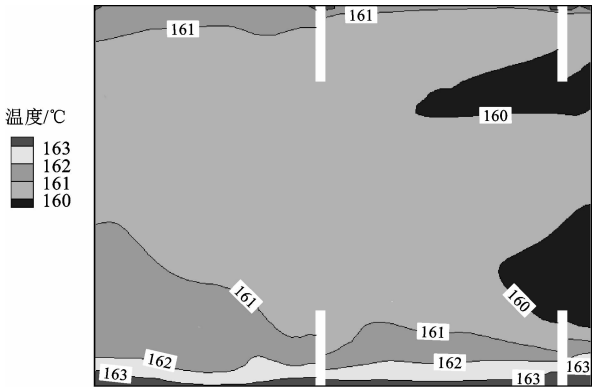


图 10 滚筒转速为 8 r/min 混合料温度场分布

Fig. 10 Temperature field of asphalt mixture at roller speed 8 r/min

较快,且混合料运动较慢,冷热混合料之间的混合传热不明显,滚筒底部的混合料不易被翻转至表面,混合料温差大,底部混合料容易被烤焦。随着滚筒转速的增大,冷热混合料之间的混合传热效果较明显,滚筒壁面受热也更为均匀,混合料的加热均匀性也

更好。从图 8~图 10 还可以看出,由于滚筒底部处于红外加热板的辐射加热区域,滚筒底部壁面的温度最高,相应地在滚筒底部的混合料温度更高一些。此外,整个滚筒壁面温度都比混合料的温度高,因此接近滚筒壁面的混合料温度也要更高一些,这都与实际工况相符。综合图 5~图 10 可以得出,当螺旋叶片的螺旋角为  $68^{\circ}$ ,叶片高度为 300 mm,滚筒转速为 5 r/min 时,沥青混合料的加热效率最高,加热均匀性最好。

## 4 结 语

(1)随着螺旋叶片螺旋角的增加,沥青混合料的加热效率先升高后降低,当螺旋角为  $68^{\circ}$  时,混合料的加热效率最高。叶片的螺旋角越小,混合料的轴向运动更明显,容易在一侧堆积,不利于混合料的传热,加热效率相对更低;叶片的螺旋角太大时,沥青混合料提升的高度减小,底部温度较高的混合料不易翻转至表面,导致冷热沥青混合料之间的混合传热效率降低,因此加热效率也不高。

(2)当叶片高度为 300 mm 时,混合料的加热效率更好。叶片高度太小,对混合料的搅拌效果不明显,混合料之间的传热效率低;叶片高度太大,大部分混合料被叶片分隔开,另外混合料有向一侧聚积的趋势,轴向混合效果不明显,传热效率会受到影响。合理的叶片结构可以更好地促进冷热沥青混合料之间的混合传热。

(3)加热滚筒转速对沥青混合料的加热效率影响较大。转速过慢,混合料运动缓慢,冷热混合料的混合与传热效果不明显,传热效率低,加热时间长;转速过快,混合料与滚筒壁面接触时间短,且滚筒壁面温度较低,混合料升温较慢;当转速为 5 r/min 时,混合料的加热效率最好;当滚筒转速达到 5 r/min 后,进一步增大滚筒转速,混合料的加热均匀性继续改善,但效果不明显。

(4)加热板形状、加热板与滚筒壁面的间距、加热板温度等也是影响红外滚筒加热沥青混合料加热效率和加热质量的重要因素,建议在下一步工作中进行更深入的研究。

## 参考文献:

### References:

[1] 邓久军. 沥青路面养护车开发[D]. 重庆:重庆大

学,2008.  
DENG Jiu-jun. The development of maintenance vehicles to asphalt pavement[D]. Chongqing: Chongqing University,2008. (in Chinese)  
[2] 王志廷. 沥青加热技术[M]. 北京:人民交通出版社,1996.  
WANG Zhi-ting. Asphalt heating technology[M]. Beijing:China Communications Press,1996. (in Chinese)  
[3] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能[M]. 北京:人民交通出版社,2001.  
SHEN Jin-an. Performance of asphalt and asphalt mixture[M]. Beijing: China Communications Press, 2001. (in Chinese)  
[4] PASANDIN A R,PEREZ I. Effect of ageing time on properties of hot-mix asphalt containing recycled concrete aggregates[J]. Construction and Building Materials,2014,52(2):284-293.  
[5] 凌 杰. 沥青混凝土热再生加热方法的研究[J]. 中国工程机械学报,2004,2(2):225-229.  
LING Jie. Study on the heating method of the asphalt mixture hot-mix recycling[J]. Chinese Journal of Construction Machinery,2004,2(2):225-229. (in Chinese)  
[6] 李 炜,纪小平. 厂拌热再生沥青混合料生产温度的确定方法[J]. 筑路机械与施工机械化,2010,27(9):57-59.  
LI Wei,JI Xiao-ping. Determination of asphalt mixture production temperature of plant mix hot recycling[J]. Road Machinery and Construction Mechanization,2010,27(9):57-59. (in Chinese)  
[7] 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):120-126.  
ZHU Song-qing,SHI Jin-fei,LIU Hai-kuan,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):120-126. (in Chinese)  
[8] 何兆益,鸥祖敏,刘 楠,等. 加热温度和时间对沥青混合料老化的影响[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2012,31(2):239-242.  
HE Zhao-yi,OU Zu-min,LIU Nan,et al. Effect of heating temperature and heating time on anti-aging performance of asphalt mixture[J]. Journal of Chong-

- qing Jiaotong University; Natural Science, 2012, 31 (2):239-242. (in Chinese)
- [9] 纪小平,孙云龙. Sasobit 温拌沥青混合料的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(14):75-78.  
JI Xiao-ping, SUN Yun-long. Experimental research of warm mix asphalt with Sasobit[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(14):75-78. (in Chinese)
- [10] 王 春,唐礼泉,关 泊,等. 温拌沥青混合料技术及其应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2012, 29(1):45-48,52.  
WANG Chun, TANG Li-quan, GUAN Bo, et al. Warm mix asphalt technology and application[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2012, 29(1):45-48,52. (in Chinese)
- [11] 耿树泽. 两种温拌改性沥青混合料的路用性能评价[J]. 筑路机械与施工机械化, 2015, 32(2):49-52.  
GENG Shu-ze. Evaluation on road performance of two types of warm mix asphalt[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2015, 32(2):49-52. (in Chinese)
- [12] ARAVIND K, DAS A. Pavement design with central plant hot-mix recycled asphalt mixes[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(5):928-936.
- [13] 于 勇. Fluent 入门与进阶教程[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2008.  
YU Yong. Tutorial of Fluent introduction and advanced[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2008. (in Chinese)
- [14] 邱爱红,龚曙光,谢桂兰,等. 变径变螺距螺旋轴旋转参数化模型及性能仿真[J]. 机械工程学报, 2008, 44(5):131-136.  
QIU Ai-hong, GONG Shu-guang, XIE Gui-lan, et al. Parametric model and performance simulation on the screw conveyor of variable diameters and variable pitches[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(5):131-136. (in Chinese)
- [15] YAPICI H, BASTURK G. CFD modeling of conjugate heat transfer and homogeneously mixing two different fluids in a stirred and heated hemispherical vessel[J]. Computers & Chemical Engineering, 2004, 28(11):2233-2244.
- [16] 李兴海. 沥青混合料的热物理特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2007.  
LI Xing-hai. Research on thermophysical characteristic of asphalt mixture[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [17] 高晓飞,刘黎萍,刘海峰,等. SAK 温拌沥青混合料性能评价[J]. 公路工程, 2009, 34(6):51-53,81.  
GAO Xiao-fei, LIU Li-ping, LIU Hai-feng, et al. Performance evaluation of warm-asphalt mixture with SAK[J]. Highway Engineering, 2009, 34(6):51-53,81. (in Chinese)
- [18] 李 博. 污泥高效干化方法及干化焚烧系统的优化运行研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.  
LI Bo. Study on efficient sludge drying method and optimal energy efficiency of sludge drying-incineration combined system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [19] CHAUDHURI B, MUZZIO F J, TOMASSONE M S. Experimentally validated computations of heat transfer in granular materials in rotary calciners[J]. Powder Technology, 2010, 198(1):6-15.
- [20] ACHOURI R, MOKNI I, MHIRI H, et al. A 3D CFD simulation of a self inducing pitched blade turbine down-flow[J]. Energy Conversion and Management, 2012, 64(12):633-641.
- [21] MOUSAZADEH F, AKKER H E A, MUDDE R F. Eulerian simulation of heat transfer in a trickle bed reactor with constant wall temperature[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 207/208(10):675-682.
- [22] SIVILEVICIUS H, PODVEZKO V, VAKRINIENE S. The use of constrained and unconstrained optimization models in gradation design of hot mix asphalt mixture[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(1):115-122.
- [23] YU H N, SHEN S H. Impact of aggregate packing on dynamic modulus of hot mix asphalt mixtures using three-dimensional discrete element method[J]. Construction and Building Materials, 2012, 26(1):302-309.