

文章编号:1671-8879(2014)03-0047-06

# 基于冷界面考虑的双层摊铺油石比设计

穆 柯<sup>1</sup>, 王选仓<sup>2</sup>, 章金钊<sup>1</sup>

(1. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068;

2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**为了研究双层摊铺工艺下混合料自由沥青分布规律, 提出其合理的油石比值, 建立了基于冷界面考虑的温度散失有限元模型, 通过对比分析上下冷界面热影响范围, 自由沥青含量折减等因素, 提出了不同摊铺厚度(8~12 cm)下双层摊铺混合料油石比下调公式, 并推广至实体工程进行验证。研究表明:与传统摊铺工艺相比, 双层摊铺工艺减少了 2 个冷界面, 结构层内含有更多的自由沥青, 比传统方法进行油石比设计的施工减少了泛油、推移病害的发生机率; 双层摊铺施工结构层厚度为 8~10 cm 时, 油石比应在传统设计的基础上下调 0.10~0.15, 结构层厚度为 10~12 cm 时, 油石比下调 0.15~0.20。

**关键词:**道路工程; 双层摊铺; 冷界面; 油石比; 有限元

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

## Asphalt-aggregate ratio design in double-layer with cold interface considered

MU Ke<sup>1</sup>, WANG Xuan-cang<sup>2</sup>, ZHANG Jin-zhao<sup>1</sup>

(1. The First Highway Survey and Design Institute Co Ltd, Xi'an 710068, Shaanxi, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to study the distribution of free asphalt in double-layer paving technology and to propose reasonable asphalt-aggregate ratio, a temperature losing FE model was established with cold interface considered. The heat influence ranges in upper and lower cold interface were contrasted and analyzed and the factors for free asphalt content reducing were analyzed. Asphalt-aggregate ratio cutting formula was presented under different paving thick messes (8-12 cm). The formula was verified by actual projects. The results show that double-layer paving reduces two cold interface, so the structure layer contains more free asphalt than traditional crafts. By traditional asphalt-aggregate ratio designing, flushing and slippage disease will have more chance for occurring. Layer thickness between 8 cm and 10 cm, asphalt-aggregate ratio should be cut down by 0.10-0.15, and between 10 cm and 12 cm, asphalt-aggregate ratio should be cut down by 0.15-0.20. 4 tabs, 10 figs, 12 refs.

**Key words:** road engineering; double-layer paving; cold interface; asphalt-aggregate ratio; FEM

收稿日期:2013-06-10

基金项目:国家科技支撑计划项目(2014BAG05B03);国家“973”计划项目(2012CBO026106-1)

作者简介:穆 柯(1983-),男,河南周口人,中交第一公路勘察设计研究院有限公司工程师,工学博士,E-mail:changdamuke@163.com。

## 0 引言

沥青路面双层一体摊铺技术是将两层沥青层一次摊铺完成的新型施工技术。由于该工艺具有摊铺厚度大、层间粘结强度高、有效压实时间长等优点,故在欧美国家中得到了广泛的认可及应用。近年来中国张家口—石家庄、石家庄—沧州、西安—商洛高速公路也均开始采用该技术进行面层施工作业。但在施工过程中发现,由于双层摊铺施工厚度较大(一般为8~12 cm),温度较高,故造成参与压实作业的自由沥青胶浆高于传统摊铺路面,如果仍按照《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)方法(以下简称《规范》)进行油石比设计,施工中会造成泛油、推移等病害,影响路面施工质量。目前双层摊铺工艺对中国广大研究者及施工单位尚属陌生,研究大多集中在双层摊铺层间结合状态及合理压实方面,而在双层摊铺合理油石比设计方面尚属空白<sup>[1-4]</sup>。为此,本文通过建立基于热传导学理论的双层摊铺混合料热散失模型,对摊铺后的沥青混合料冷界面热散失规律进行研究,确定了与空气及下面层接触的冷界面影响范围,并提出了基于不同摊铺厚度的双层摊铺混合料油石比折减公式,研究成果可为双层摊铺混合料设计提供理论依据。

## 1 理论基础

道路温度场主要受以下因素影响:①对流作用;②太阳对路面辐射;③沥青路面向大气的长波辐射;④摊铺时的混合料温度。4种因素综合作用决定路面结构内热流分布,结构层内热流分布控制方程如下所示<sup>[5-8]</sup>。

### 1.1 摊铺后的沥青层上表面热流边界

双层摊铺后的混合料热损失包括,与外界空气进行对流换热及向下面层进行热传导;热吸收为每平方米吸热功率约140 W(太阳辐射),路面内传热方程为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_s Q(t) + B[T_a - T|_{z=0}] \quad (1)$$

式中: $\lambda$ 为导温系数; $T$ 为外界温度; $T_a$ 为路面温度; $z$ 为深度方向坐标; $\alpha_s$ 为热流吸收系数; $Q(t)$ 为进入路面热流; $B$ 为复合换热系数。

式(1)还可表示为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = B(T_a + \frac{\alpha_s Q(t)}{B} - T|_{z=0}) \quad (2)$$

参考文献<sup>[6-7]</sup>研究成果,认为在计算周期较短

的情况下,当路面结构达到一定深度时,面层传热对其温度分布影响可忽略不计,依据本文计算工况,取温度最大影响深度为5 m。

### 1.2 数值计算方程

假定 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 分别为路面结构纵向、横向、深度方向坐标,其温度梯度可由式(3)确定

$$\text{grad}(T) = i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3)$$

式中: $i$ 、 $j$ 、 $k$ 分别为 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的导热系数,由于路面材料导热各向同性,故 $i=j=k$ 。

假定路面结构第 $i$ 层热传导系数与导温系数分别为 $\lambda_i$ 和 $\alpha_i$ ( $i=1,2,\dots,n$ ),厚度为 $h_i$ ( $i=1,2,\dots,n$ ,其中 $h_n=\infty$ ), $t$ 为计算时间,温度函数为 $T_i$ ,则 $T_i=(x,y,z,t)$ ,并令 $g_0=h_1$ , $g_i=\sum_{j=1}^{i-1} h_j$ ,则 $T_i=T_i(x,y,z,t)$ 满足热传导方程

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \alpha_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right) & 0 \leq z \leq g_0 \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} = \alpha_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right) & g_0 \leq z \leq g_1 \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial T_n}{\partial t} = \alpha_n \left( \frac{\partial^2 T_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial z^2} \right) & g_{n-2} \leq z \leq \infty \end{cases} \quad (4)$$

## 2 有限元计算分析

为了研究混合料摊铺过程中上、下接触面温度散失状况,对比分析与空气接触界面及与下面层接触面温度场分布的差异,建立了基于热传导理论的界面温度场分析有限元模型,分析冷界面出现位置及其影响范围;冷界面内,由于热量散失迅速,温度较低,使得松铺混合料内自由沥青难以流动。同时,光轮压路机碾压过程中,结构层内更多的自由沥青向上、下2个冷界面移动,并被固化在上、下表面,形成“泛油”病害。

由下页图1可知,一般面层施工作业,中、上两层混合料由两次摊铺及碾压工序完成,分层施工使上、中面层混合料共计形成4个冷界面;双层摊铺由于减少了一次施工作业,仅形成2个冷界面,这就意味着同厚度结构层工况下,采用双层摊铺工艺的沥青层将含有更多自由胶浆。因此,如继续沿用《规范》方法进行油石比计算,必然会使路面在使用过程中出现泛油、推移等病害。

在室内热传导试验及查阅现有沥青路面温度场研究成果的基础上,确定路面结构层的热传导参数,见下页表1<sup>[8-11]</sup>。

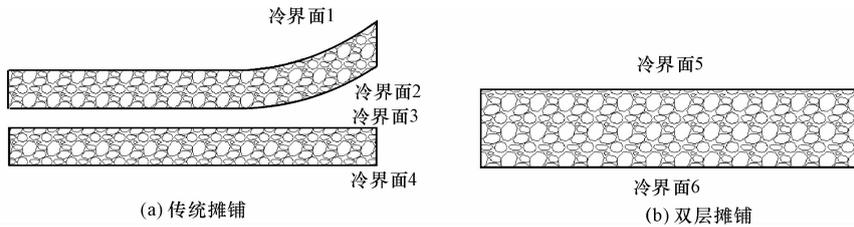


图 1 传统摊铺模式与双层摊铺模式冷界面分布差异

Fig. 1 Cold interface distribution difference between traditional and double-layer paving

表 1 沥青结构层内材料热传导参数

Tab. 1 Thermal conductivity parameters of asphalt layers

沥青结构层材料参数	沥青结构层	水泥稳定碎石	底基层	路面长波热辐射率 $\epsilon$	辐射吸收率 $\alpha_s$
热传导系数/ ( $K \cdot (ms \cdot ^\circ C)^{-1}$ )	1.20	1.46	1.33	0.80	0.90
材料密度/ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	2 400	2 300	2 100		
热容 $C$ / ( $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C$ )	955	912	943		

通过建立摊铺路面热散失模型,对接触面内温度分布梯度进行系统研究,假定混合料摊铺温度为  $170^\circ C$ ,摊铺作业时气温  $20^\circ C$ ,风速  $2 m/s$ ;采用上述参数进行隐式计算,提取上、下冷界面内不同时刻热量流动情况进行系统研究,结果如图 2、图 3 所示。

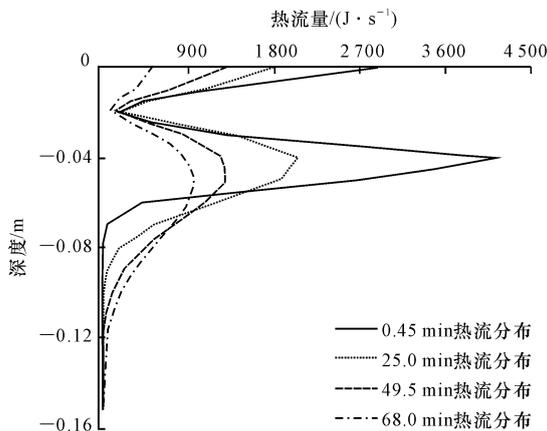


图 2 上冷界面热流量分布随时间变化规律

Fig. 2 Heat flow distribution variation with time in upper interface

由图 2、图 3 可知,摊铺后的混合料在与外界接触面位置,由于温差巨大,上、下冷界面处均存在强烈的热流交换,随着路面深度不断增大,热量流动渐趋平缓,至路面结构层  $1.5 \sim 2.0 cm$  深度处换热开始稳定;随着时间的流逝,上、下冷界面处热交换沿路面深度方向均逐渐平稳。热流分布规律表明,混合料与外界接触面位置,由于温差较大,热交换剧烈等原因,有一层特殊的接触面存在,该面内温度降低迅速,沥青胶浆无法自由流动,将其定义为冷界面。

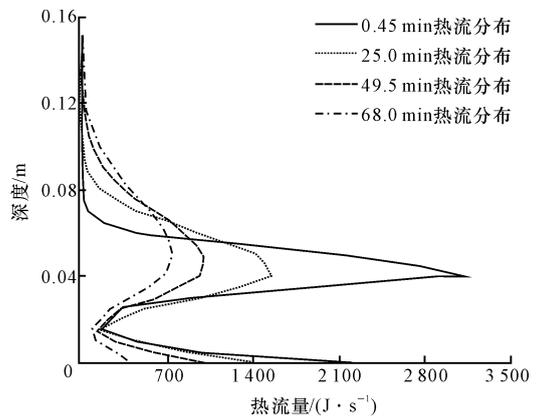


图 3 下冷界面热流量分布随时间变化规律

Fig. 3 Heat flow distribution variation with time in lower interface

上冷界面为混合料与空气接触界面,主要换热形式为空气对流及热辐射,下冷界面指混合料与下面层接触面,主要换热形式为热传导。

为了对比分析混合料与空气、下面层接触处冷界面温度场分布规律的区别,提取两界面处温度场分布等值线图进行分析,如下页图 4、图 5 所示。

图 4、图 5 分别为摊铺 2 min 后混合料上、下冷界面温度分布等值线图。其中:上冷界面由于与空气接触,在与空气对流换热及表面热辐射的共同作用下,温度散失较快;下冷界面与下面层接触,只存在混合料间的热传导,因此温度散失较慢;依据文献 [12] 研究成果,认为当混合料低于  $100^\circ C$  工况下,即便增加压实功,也很难达到预期的压实效果,采用此标准作为冷界面影响范围的界限时,摊铺 2 min 后上冷界面影响范围略大于下冷界面。

为了判定上、下冷界面影响范围随时间变化的发展规律,对冷界面处单元进行细化并计算,提取不同时段冷界面温度场计算结果进行分析,结果如下页图 6、图 7 所示。

由图 6、图 7 可得,摊铺后的混合料在与空气、下面层表面的接触面处会形成不同厚度的冷界面,且冷界面的影响范围随时间的增长逐渐加深。其中在摊铺完成后的  $2 \sim 8 min$ ,上冷界面影响深度范围

为 1.5~2.0 mm;下冷界面影响深度范围为 1.0~1.5 mm;上、下冷界面内混合料温度衰减迅速,且温

度均低于 100 °C,沥青胶浆很难自由移动至骨料间隙或均匀包裹粒料。

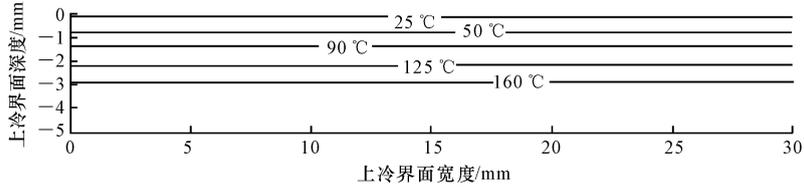


图 4 摊铺 2 min 后混合料上冷界面温度等值线

Fig. 4 Temperature isoline of upper interface after two minutes paving

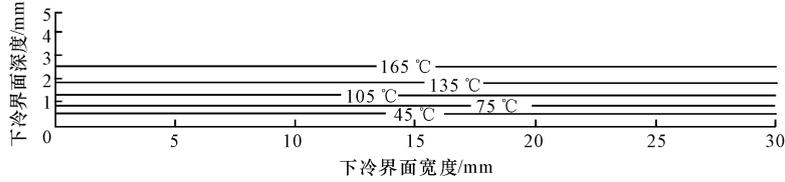


图 5 摊铺 2 min 后混合料下冷界面温度等值线

Fig. 5 Temperature isoline of lower interface after two minutes paving

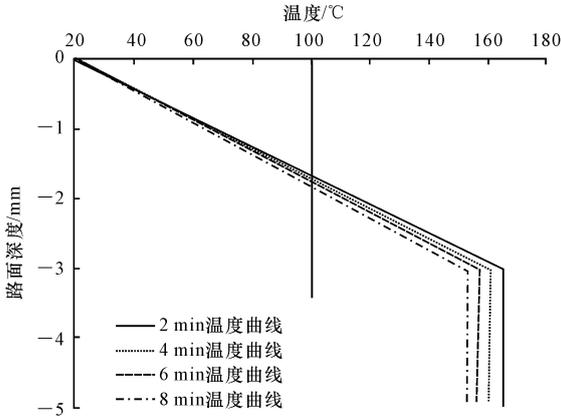


图 6 上冷界面温度场随时间变化规律

Fig. 6 Temperature field variation with time in upper interface

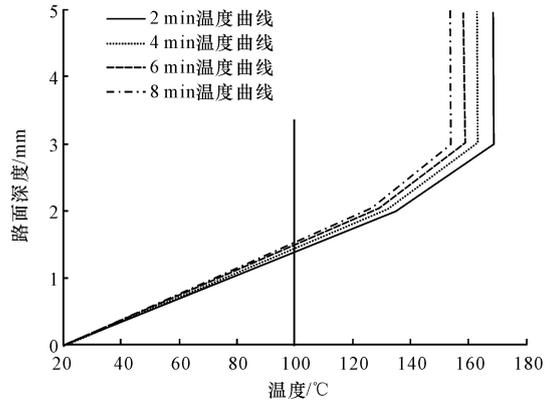


图 7 下冷界面温度场随时间变化规律

Fig. 7 Temperature field variation with time in lower interface  
青质量); $\omega$ 为《规范》方法求得的沥青含量; $d$ 为摊铺层的松铺密度; $H_z$ 为双层摊铺施工厚度; $h_s$ 为与空气接触冷界面厚度; $h_x$ 为与下面层接触冷界面厚度。

### 3 双层摊铺油石比调整

由计算结果知 1.5~2.0 mm 为沥青冷界面厚度,则摊铺混合料内自由沥青含量计算式为

$$M_z = \omega d \frac{\omega d (h_s + h_x)}{H_z} \quad (5)$$

式中: $M_z$ 为单位厚度内自由沥青质量,量纲取值与松铺密度  $d$  及厚度  $H_z$  单位相关(如密度单位  $\text{kg}/\text{cm}^3$ 、厚度单位  $\text{cm}$ ,则  $M_z$  为  $1 \text{ cm}^2$  面积下  $1 \text{ cm}$  厚度内自由沥

$\omega$ 可按《规范》方法计算确定,与空气接触上冷界面值为 1.5~2.0 mm,下冷界面值为 1.0~1.5 mm;因此式(5)中  $M_z$  计算结果主要与双层摊铺施工厚度相关,对不同摊铺厚度下双层摊铺自由沥青含量进行计算,并与传统摊铺模式对比,见表 2。

表 2 双层及分层摊铺工艺下结构层内自由沥青含量对比

Tab. 2 Contrast of free asphalt contents between traditional and double-layer paving

施工方式	结构层厚度/cm		冷界面个数/个		界面厚度/mm		自由沥青占沥青总量比率/%
分层摊铺	上面层	3	空气接触	2	空气接触	3~4	92~94
	下面层	7	下面层接触	2			
双层摊铺	上面层+	10	空气接触	1	下面层	2~3	96~97
	下面层		下面层接触	1			

由表2可知:传统摊铺工艺中自由沥青占沥青总量的92%~94%。采用双层摊铺工艺,减小了上、下2个冷界面,自由沥青比率提升至96%~97%;《规范》中油石比设计方法在双层摊铺工艺中设计值偏大,因此应以自由沥青所占比率为控制指标,按式(5)提供的计算方法,对《规范》的设计油石比进行折减,折减后的结果如表3所示。

表3 不同厚度工况下双层摊铺油石比折减

Tab.3 Reductions of asphalt-aggregate ratio in double-layer paving under different thicknesses

摊铺结构	施工厚度/cm	《规范》的设计油石比值折减/%
上面层+中面层	8~10	0.10~0.15
上面层+中面层	10~12	0.15~0.20

由表3可知,与《规范》中设计方法相比,双层摊铺油石比的折减主要与摊铺层厚度相关,当上、中面层施工厚度为8~10 cm工况时,油石比较《规范》值下调0.1%~0.15%;当上、中面层组合厚度为10~12 cm工况时,油石比较《规范》值下调0.15%~0.2%。

## 4 现场温度观测及油石比调整

### 4.1 现场温度检测

为了验证冷界面处温度预估模型的准确性,本文对西商高速公路(西安—商洛)洛南段铺设不同路面组合的双层摊铺试验路,对摊铺后的混合料表面冷界面温度进行实测分析。摊铺后以红外测温设备获取混合料温度为168℃,温度计实测摊铺时气温为13℃;下层混合料温度为14.4℃,风速为2 m/s软风;对摊铺后混合料直至碾压终了的温度变化规律进行实测(混合料表面1 mm处值),将结果与模拟计算值进行对比,如图8所示。

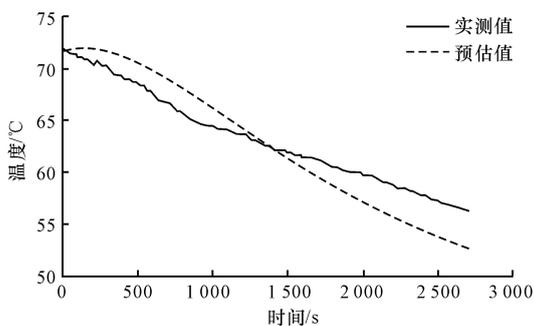


图8 路面2 cm处温度实测值与预估值对比  
Fig.8 Comparison of measured and predicted temperature at 2 cm below road surface

由图8可知,本文建立的双层摊铺冷界面温度预估模型具有较高的预估精度,冷界面处实测值与

预估值最大误差为6.4%,满足实际工程要求。

### 4.2 双层摊铺油石比调整

采用式(5)的折减公式对试验路面油石比进行折减计算,并将折减后的油石比与原油石比进行对比分析,如表4所示。

表4 试验路段油石比折减

Tab.4 Reductions of asphalt-aggregate ratio in test road

试验路 工况	路面结构组合		《规范》的 油石比/%	折减后的 油石比/%
	上面层	中面层		
工况1	上面层	3 cm AC-13	4.8	4.6
	中面层	7 cm AC-20	4.3	4.2
工况2	上面层	4 cm AC-13	4.8	4.6
	中面层	6 cm AC-20	4.3	4.2
工况3	上面层	4 cm SMA-13	5.8	5.6
	中面层	6 cm AC-20	4.3	4.2
工况4	上面层	4 cm SMA-13	5.8	5.6
	中面层	6 cm SMA-16	5.5	5.4

按照表4所提供的方案进行油石比调整后,碾压过程中基本未出现泛油、粘轮等病害,既节省了沥青用量,又减少了施工期病害的发生。

现场取出32组芯样,对上、中面层进行切割处理,测量油石比降低对压实度的影响,如图9、下页图10所示。结果发现,双层摊铺油石比调整后混合料压实度无明显变化,说明降低油石比后对路面压实并不会造成不利影响。



图9 现场取芯编号

Fig.9 Serial number of test sample

## 5 结语

(1)与传统工艺相比,双层摊铺技术可减少2个冷接触界面,较传统工艺结构层内自由沥青含量更多,因此施工过程中应考虑进行折减,以免发生推移、泛油等病害。

(2)通过基于热传导理论的有限元分析可知,在



图 10 切割测量上、中面层压实度

Fig. 10 Cutting surface and middle layer for compaction test

混合料表面位置,存在着强烈的热交换,且这种热交换行为随着深度的增大而迅速降低,容易在混合料表面形成冷界面,同时通过细化模型得出上冷界面影响深度为 1.5~2.0 mm,下冷界面影响深度为 1.0~1.5 mm。

(3)提出了基于不同摊铺厚度的双层摊铺混合料油石比折减公式,并根据该公式进行了实体工程应用。

(4)目前,双层摊铺技术在欧美国家的推广应用呈不断加速态势,中国对此工艺的研究方兴未艾。本文虽然基于冷界面考虑,讨论该工艺的油石比折减方法,但对于不同外界气温、风速、辐射等复杂条件下冷界面形成机理等问题涉及较少,还有待后续研究工作的进一步开展。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 秦健,孙立军. 沥青路面温度场的分布规律[J]. 公路交通科技, 2006, 23(8): 18-21.  
QIN Jian, SUN Li-jun. Study on asphalt pavement temperature field distribution pattern[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(8): 18-21. (in Chinese)
- [2] 穆柯,王选仓,王朝辉,等. 双层摊铺的温度散失规律研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2012, 29(1): 32-34.  
MU Ke, WANG Xuan-cang, WANG Zhao-hui, et al. Study on law of temperature drop of double-layer paving[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2012, 29(1): 32-34. (in Chinese)
- [3] 郭红兵,陈栓发. 沥青路面热-荷载耦合应力数值分析[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2010, 30(2): 15-19.  
GUO Hong-bing, CHEN Shuan-fa. Numerical analysis of temperature load coupling stress for asphalt pavement[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(2): 15-19. (in Chinese)

- ral Science Edition, 2010, 30(2): 15-19. (in Chinese)
- [4] Zhou H P, Holikatti S, Vacura P. Caltrans use of scrap tires in asphalt rubber products: a comprehensive review[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 39-48.
- [5] 张占军. 水泥混凝土桥面沥青混凝土铺装结构研究[D]. 西安:长安大学, 2000.  
ZHANG Zhan-jun. Research on design method of asphalt concrete pavement for concrete bridge deck structure [D]. Xi'an: Chang'an University, 2000. (in Chinese)
- [6] 马 磊,胡 浩,汪海年. 考虑温度非均匀性的沥青路面温度应力分析[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2011, 31(1): 1-5.  
MA Biao, HU Hao, WANG Hai-nian. Analysis of thermal stress on asphalt pavement considering temperature heterogeneity[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(1): 1-5. (in Chinese)
- [7] Mrawira D M, Luca J. Thermal properties and transient temperature response of full depth asphalt pavements[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2002, 1809(1): 160-171.
- [8] Hermansson A. Simulation model for calculating pavement temperature including maximum temperature [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2000, 1699(1): 134-141.
- [9] 穆 柯. 沥青路面面层双层一体摊铺技术研究[D]. 西安:长安大学, 2012.  
MU Ke. Research on double layer paving technology for asphalt pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [10] 王 辉,李雪连,张起森. 高温重载作用下沥青路面车辙研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(5): 139-144.  
WANG Hui, LI Xue-lian, ZHANG Qi-sen. Rutting in asphalt pavement under heavy load and high temperature [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(5): 139-144. (in Chinese)
- [11] 郑南翔,牛思胜,许新权. 重载沥青路面车辙预估的温度-轴载-轴次模型[J]. 中国公路学报, 2009, 22(3): 7-13.  
ZHENG Nan-xiang, NIU Si-sheng, XU Xin-quan. Temperature, axle load and axle load frequency model of rutting prediction of heavy-duty asphalt pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(3): 7-13. (in Chinese)
- [12] 贾 璐. 沥青路面高温温度场数值分析和实验研究[D]. 长沙:湖南大学, 2004.  
JIA Lu. Numerical analysis and experimental research of high temperature field in asphalt pavement [D]. Changsha: Hunan University, 2004. (in Chinese)

