

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2014.08.002

# 沥青路面温度场的热量分析研究

延西利<sup>1</sup>, 张世平<sup>2</sup>, 白伟<sup>1</sup>, 郑涛<sup>2</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 四川广巴高速公路有限责任公司, 四川 成都 610041)

**摘要:**以高速公路沥青路面为依托工程,现场连续实测了各结构层的温度,分析了高温和低温温度场及其日周期变化规律。在此实测数据基础上,选取合适的材料热物性参数,针对冬季低温和夏季高温2种情况,计算分析了沥青路面的热量交换,以期进一步认识沥青路面的温度场。结果表明,沥青路面的温度场可以用结构层单位体积的热量变化来描述,二者的变化规律具有良好的对应性;路面热交换主要集中于沥青层,而在基层的变化较小;路面在冬季处于放热状态,在夏季处于吸收并储存热量状态。

**关键词:**道路工程; 沥青路面; 温度场; 现场测试; 热量分析

中图分类号: U416.217

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2014)08-0007-06

## Analysis on Heat of Temperature Field of Asphalt Pavement

YAN Xi-li<sup>1</sup>, ZHANG Shi-ping<sup>2</sup>, BAI Wei<sup>1</sup>, ZHENG Tao<sup>2</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China;

2. Sichuan Guangyuan - Bazhong Expressway Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610041, China)

**Abstract:** Based on the project of expressway asphalt pavement, the temperatures of asphalt pavement structure layers are continuously measured in-situ, and the low and high temperature fields and its daily periodic variation regularity are analyzed. Based on these temperature data and by selecting the appropriate thermo-physic parameters of pavement materials, the heat exchange in asphalt pavement is calculated under the conditions of the low temperature in winter and the high temperature in summer, which will promote a better understanding of the temperature field of asphalt pavement. The result shows that (1) the temperature field of asphalt pavement can be described by the thermal variation per unit volume in each layer, the changing regularities under the 2 conditions have a good correspondence; (2) the heat exchange of asphalt pavement is concentrated in asphalt layer but it is less in pavement base; (3) pavement is in exothermic state in winter and in endothermic state in summer.

**Key words:** road engineering; asphalt pavement; temperature field; in-situ test; thermal analysis

## 0 引言

沥青路面的力学行为和使用性能受温度的影响很大且十分敏感,国内外学者进行了大量的研究与分析<sup>[1-3]</sup>。研究人员认识到温度场的重要性,开展了大量的研究工作,主要集中在测试技术及方案、数据处理及统计分析等方面<sup>[4-5]</sup>,但没有从温度场

的热源入手,分析温度场的热量传递及变化。随着自然界的温度变化,路面不断发生热交换,使得路面结构内部的温度发生变化。热量是沥青路面温度场产生的根本源泉。

沥青路面吸收或释放热量,导致内部温度变化,并会引起沥青路面温度稳定性方面的问题。如在夏季,沥青路面吸收并储存热量,内部温度可达60~

收稿日期: 2013-08-26

基金项目: 中央高校基本科研业务专项基金项目(CHD2011ZD013); 四川省交通科技项目(2010223)

作者简介: 延西利(1963-),男,陕西绥德人,博士,教授。(xili.yan@chd.edu.cn)

65 ℃，在渠化交通的重复作用下，很容易出现车辙等病害；在冬季，沥青路面释放热量，温度降低，容易产生低温开裂病害<sup>[6-7]</sup>。

本文以高速公路现场连续实测的路面内部温度为基本数据，结合热传导试验结果，选取合适的材料热物性参数，针对冬季低温和夏季高温2种情况，分析计算沥青路面的热量交换，用单位体积的热量变化来描述沥青路面的温度场<sup>[8-10]</sup>。

## 1 沥青路面的热交换

沥青路面暴露于自然环境之中，经受着各种气候的周期性影响。影响路面温度场的主要环境因素有：气温、辐射、风速、降雨等，这些因素构成了自然界的能量变化，并与路表之间不断地进行热量交换，路面吸收或者放出热量，形成了路面结构内部不断变化的温度场。路面的热量交换过程，存在着3种传热方式，即热传导、热对流和热辐射。对流和辐射是路表与外界环境换热的主要方式，路面内部则以热传导为主，如图1所示。沥青路面的热交换总体处于动态平衡，热量以热传导方式，不断地在路面内部进行热量传递，从而产生温度场。

对沥青路面的温度场进行分析，传统方法是考虑某一时刻、某一深度处的温度状态  $T(t, z)$ ，但从路面的热交换和结构分析来看，还应考虑这样3个基本出发点：(1) 要从热源角度出发，来认识温度场；(2) 应考虑任意结构层整体的热量变化，排除温度取值单点几何位置之困扰（不好描述某个或整个结构层）；(3) 可以进行热量变化的累计。

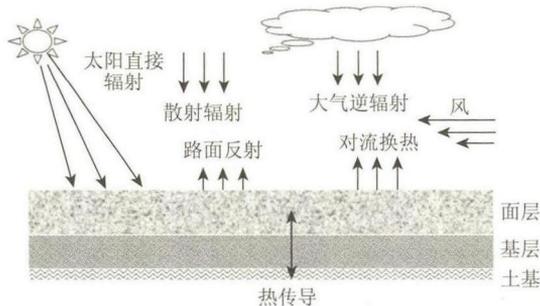


图1 沥青路面的热交换示意图

Fig. 1 Schematic diagram of heat exchange of asphalt pavement

## 2 实测路面温度

本文以四川省广元至巴中高速公路为依托工程，施工过程中在路面各结构层之间埋设了温度传感器；运营过程中应用数据采集仪 SZZX-MCU14 对路面结

构温度进行了全天候 24 h 不间断采集，采集频率为 1 次/30 min。依托工程为双向四车道、沥青路面高速公路，课题研究分 3 个路段在超车道轮迹下的路面内布置了传感器，路面结构及温度传感器的埋设位置如图 2 所示。经过 2 年多的路面温度数据采集，建立了一个庞大的数据库，为科学研究提供数据支持<sup>[8-9]</sup>。

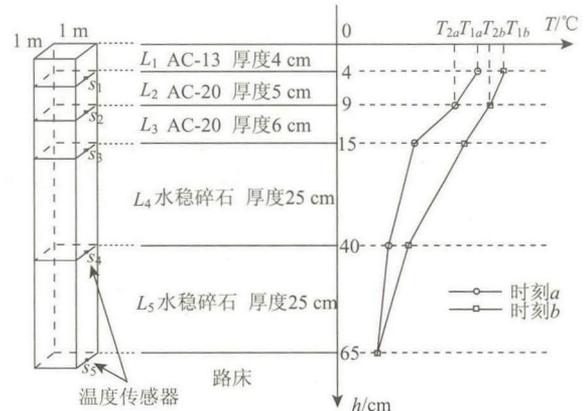


图2 沥青路面结构及热量计算示意图

Fig. 2 Schematic diagram of asphalt pavement structure and thermal calculation

数据库包含了该路面一年四季的温度数据，但沥青路面的破坏主要发生在冬季低温和夏季高温，因此本文针对低温和高温2种情况加以介绍分析，把冬季和夏季这2个季节的代表性天气作为分析的特征气候天气<sup>[8]</sup>。通过对 12~2 月和 7~9 月的温度数据筛选，发现 2011 年 1 月 16 日路面各结构层的温度迅速降低，并达到了 12~2 这 3 个月的最低温度值，可选取该天为冬季低温代表性天气；2011 年 8 月 4~6 日路面各结构层的温度不断升高，并在 6 日这一天达到了 7~9 这 3 个月最高温度值，可选取 8 月 6 日为夏季高温代表性天气，如图 3 所示。

从冬季最低温和夏季最高温的测试结果（图 3）可以看出，沥青路面的温度变化主要发生在沥青层，而基层和底基层的日温度变化很小；结合数据库中连续日期的温度数据<sup>[8]</sup>，沥青路面的日最低温度发生在 6:00—8:00 之间、最高温度在 14:00—16:00 之间。

## 3 热量计算原理

### 3.1 基本原理

物体的温度改变量为  $\Delta T$  时，需要吸收或放出的热量为：

$$Q = cm \cdot \Delta T = cpV \cdot \Delta T, \quad (1)$$

式中， $c$  为比热容； $m$  为质量； $\rho$  为密度。

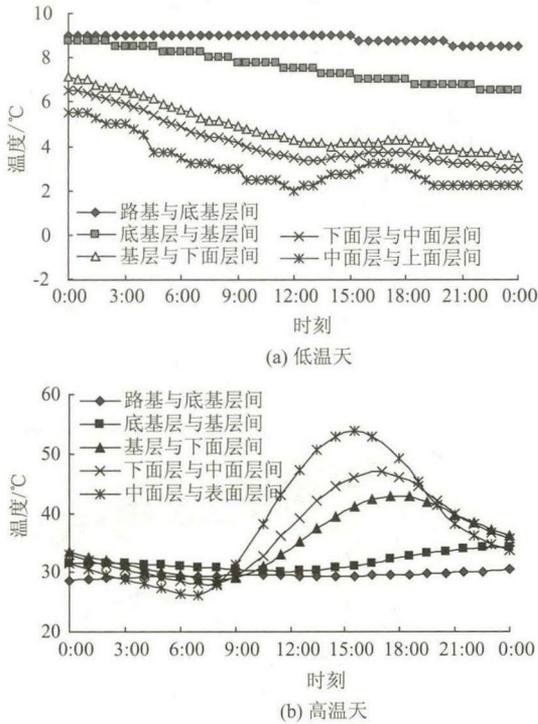


图 3 沥青路面的日温度变化图

Fig. 3 Daily temperature variation of asphalt pavement

物质的比热容  $c$ 、导热系数  $\lambda$ 、导温系数  $\alpha$  之间的关系式为:

$$c\rho = \frac{\lambda}{\alpha}, \quad (2)$$

将式 (2) 代入式 (1) 得:

$$Q = \frac{\lambda}{\alpha} V \cdot \Delta T. \quad (3)$$

设某一路面有  $n$  个结构层, 取单位面积的路面 (记为  $S=1 \text{ m}^2$ ) 作为分析对象, 则当  $S$  的温度在 2 个时刻的平均改变量为  $\Delta \bar{T}$  时,  $n$  层路面的总热量变化为:

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i h_i}{\alpha_i} \cdot \Delta \bar{T}_{L_i}, \quad (4)$$

式中,  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  分别为单位面积各结构层的热量改变量;  $h_i$  为结构层厚度;  $\Delta \bar{T}_{L_i}$  为平均温度改变量。可见, 当已知路面各结构层的厚度、平均温度改变量、材料热物性参数时, 即可计算路面各结构层及整体结构的热量变化。

### 3.2 实体工程的热量计算

对于图 2 所示依托工程的路面结构和温度传感器布置, 代表性日期的冬季低温和夏季高温测试数据见图 3。由于路面各结构层厚度较薄 (最大为基层 25 cm), 所以在进行热量计算时, 假设各结构层的材料为均质、各向同性、热物性参数为常数, 温度

在各结构层内部呈线性分布。

图 2 中  $L_i$  为路面各结构层;  $h_i$  为对应的厚度 ( $i=1, \dots, 5$ );  $L_i$  与  $L_{i+1}$  之间的温度为  $T_i$ , 在时刻  $a$  的温度为  $T_{ia}$ 、时刻  $b$  的温度为  $T_{ib}$ 。

(1) 当  $i \geq 2$  时, 从  $a$  时刻到  $b$  时刻, 中面层及以下各结构层 ( $i \geq 2$ ) 的平均温度改变量为:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{T}_{Li} &= \Delta \bar{T}_{Lib} - \Delta \bar{T}_{Lia} = \frac{1}{2} [T_{(i-1)b} + T_{ib}] - \\ &\frac{1}{2} [T_{(i-1)a} + T_{ia}] = \frac{1}{2} [T_{(i-1)b} - T_{(i-1)a}] + \\ &(T_{ib} - T_{ia}) \} = \frac{1}{2} (\Delta T_{i-1} + \Delta T_i), \quad (5) \end{aligned}$$

式中,  $\bar{T}_{Lia}$  为  $a$  时刻  $L_i$  层的平均温度;  $\bar{T}_{Lib}$  为  $b$  时刻  $L_i$  层的平均温度; 由于层间温度分布为线性, 所以  $a$  时刻  $L_i$  层的平均温度为该层上下表面温度的均值, 即:

$$\bar{T}_{Lia} = \frac{1}{2} [T_{(i-1)a} + T_{ia}],$$

同理:

$$\bar{T}_{Lib} = \frac{1}{2} [T_{(i-1)b} + T_{ib}],$$

式中,  $\Delta T_{(i-1)}$  为  $L_i$  层上表面从  $a$  时刻到  $b$  时刻的温差, 则  $\Delta T_{(i-1)} = T_{(i-1)b} - T_{(i-1)a}$ ;  $\Delta T_i$  为  $L_i$  层下表面从  $a$  时刻到  $b$  时刻的温差,  $\Delta T_i = T_{ib} - T_{ia}$ 。

(2) 当  $i=1$  时, 由于  $L_1$  层的表面直接与外界车辆接触, 无法布置温度传感器进行连续不间断的测试, 而是在每月现场提取数据时, 使用表面热敏温度计测量, 所以  $L_1$  的平均温度需单独考虑。  $L_1$  的厚度  $h_1=4 \text{ cm}$ , 较薄, 表面平均温度  $\bar{T}_{L1}$  与底面温度相差较小<sup>[8-9]</sup>, 计算中可用底面温度近似平均温度, 即:

$$\bar{T}_{L1} = T_1. \quad (6)$$

利用每月测试的路表温度数据对式 (6) 进行计算, 发现路面热量的分析误差很小, 故  $L_1$  的平均温度改变量为:

$$\Delta \bar{T}_{L1} = \bar{T}_{L1b} - \bar{T}_{L1a} = T_{1b} - T_{1a} = \Delta T_1. \quad (7)$$

对于依托工程沥青路面, 单位面积的热量变化计算公式为:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 = \frac{\lambda_1}{\alpha_1} h_1 \cdot \Delta T_1 + \frac{1}{2} \sum_{i=2}^5 \frac{\lambda_i h_i}{\alpha_i} \cdot (\Delta T_{i-1} + \Delta T_i). \quad (8)$$

### 4 计算参数的选取

为了更好地认识和选取材料的热物性参数, 按

照傅立叶导热定律的基本原理,自行设计开发了一维稳态双平板式导热系数测定仪<sup>[9-10]</sup>,并针对依托工程采用的沥青混凝土类型,取用中间类型,测定了AC-16在不同温度下的导热系数值(表1)。

表1 不同温度下沥青混合料AC-16的导热系数试验结果

Tab.1 Experimental result of thermal conductivity of asphalt mixture AC-16 at different temperatures

加热温度/℃	20	30	40	50	60
导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·℃)	1.18	1.33	1.58	1.70	1.90

由表1可以看出,沥青混合料的导热系数随温度的升高而增大,并不是固定值。且混合料的级配组成对导热系数也有重要影响,粗级配沥青混凝土的导热系数大于细级配<sup>[11]</sup>。本文以实测数据为基础,参考国内外文献[9],综合考虑温度、级配组成等因素对路面材料热物性参数的影响,在热量计算中选取路面材料的热物性参数值如表2所示。

表2 路面材料的热物性参数取值表

Tab.2 Values of thermo-physic parameters of pavement

路面状态	材料类型	导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·℃)	导温系数/(m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )
低温时	AC-13	0.8	3.45×10 <sup>-7</sup>
	AC-20	1.2	4.36×10 <sup>-7</sup>
	水稳碎石	0.7	3.89×10 <sup>-7</sup>
高温时	AC-13	1.5	6.02×10 <sup>-7</sup>
	AC-20	1.9	6.23×10 <sup>-7</sup>
	水稳碎石	1.3	6.39×10 <sup>-7</sup>

路面材料的热物参数在高温和低温状态下会有一些微小的差异,为了更客观合理地反映路面在低温和高温时的热量变化,宜对处于不同温度状态的路面,按照表2对材料的热物参数分别取值。

## 5 热量分析结果

以依托工程路面结构内部的实测温度为基本数据,针对冬季低温和夏季高温2种情况,用式(8)进行路面的热量累计计算。计算时,规定吸热为正、放热为负;计算从0:00开始,以1h为时间间隔、全天24h为时间段;计算首先以单位面积(实体厚度)、然后以单位体积为计算单元。

### 5.1 冬季低温沥青路面的热量变化

本文把2011年1月16日作为路面处于冬季低温状态的代表日,根据这一天的温度实测数据值(图3),并在表2中选取低温时的材料热物性参数值,利用式(8)和上述计算方法,计算得到单位面积路面整体结构的累计热量变化(图4(a))和单位面

积各个结构层的累计热量变化(图4(b))、以及单位体积各个结构层的累计热量变化(图5)。

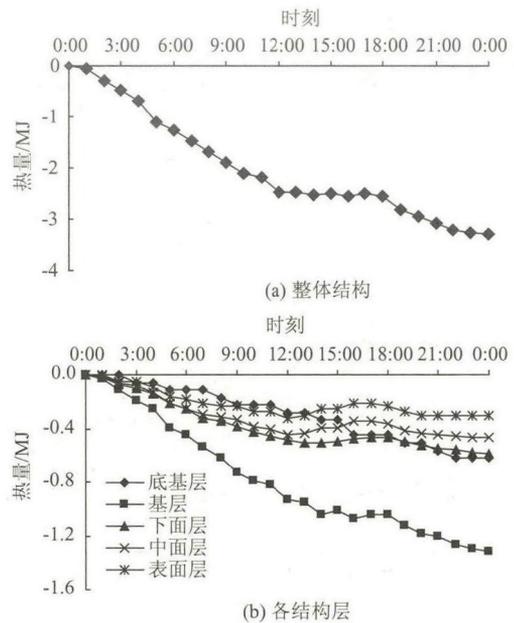


图4 低温天单位面积路面累计热量变化图

Fig.4 Accumulative thermal variation of pavement structure per unit area in cold day

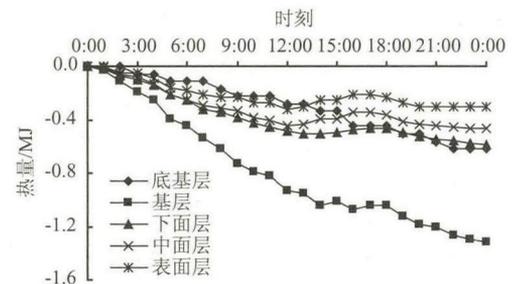


图5 低温天单位体积路面各结构层的累计热量变化图

Fig.5 Accumulative thermal variation of each layer of pavement structure per unit volume in cold day

由图4(a)可以看出,路面结构整体在冬季低温时总体处于热量释放过程;由图4(b)可以看出,路面各结构层的热量释放量以路面基层为最大,这是由于它所处的位置在土基热与沥青面层冷之间、热交换幅度必然增大,且单位面积时自身厚度远大于沥青层,也即大体积热量释放。而由图5可以看出,沥青层的单位体积热量释放量和释放速度均大于(底)基层,说明路面的热量变化主要发生在沥青层;(底)基层的热量释放较为匀速、几乎没有波动,同时沥青层在13:00—18:00之间处于吸热状态。这些变化规律与温度场的日变化情况(图3)相一致,具有很好的对应性。

## 5.2 夏季高温沥青路面的热量变化

同理, 把2011年8月6日作为路面处于夏季高温状态的代表日, 根据这一天的温度实测数据值(图3), 并在表2中选取高温时的材料热物性参数值, 采用如5.1同样的计算方法, 计算得到单位面积路面结构整体的累计热量变化(图6(a))和单位面积各个结构层的累计热量变化(图6(b))、以及单位体积各个结构层的累计热量变化(图7)。

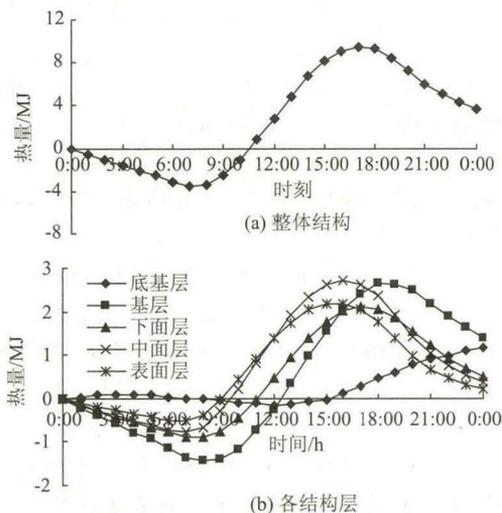


图6 高温天单位面积路面的累计热量变化图

Fig. 6 Accumulative thermal variation of pavement structure per unit area in hot day

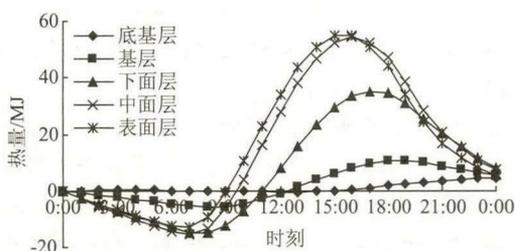


图7 高温天单位体积路面各结构层的累计热量变化图

Fig. 7 Accumulative thermal variation of each layer of pavement structure per unit volume in hot day

由图6(a)可以看出, 路面结构整体在夏季高温时总体处于热量吸收过程, 单位面积累计吸热量在16:00—18:00时达到最大值9.4 MJ(相当于 $2.6 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的电能热), 但在00:00—10:30却处于放热状态。路面在一天中经历了放热—吸热循环后, 路面整体的净吸热量为3.7 MJ。如果经历连续几天的高温天气, 路面每天的净吸热量累积, 内部会聚积大量的热量, 温度会节节攀升, 并在车辆荷载下, 会导致沥青路面高温失稳。

同样由图6(b)可以看出, 由于大体积作用, 路面基层在夏季高温时能够吸收大量热量, 基本上

达到与沥青层同样的水平。但从单位体积的路面各结构层累计热量变化来看(图7), 沥青层3个组成层(表、中、下面层)累计热量的变化曲线无论是波动幅度还是在峰值的大小都远大于基层和底基层, 这说明路面的热量变化主要集中于沥青层, (底)基层的热量变化很小; 且沥青层中的热量交换速度远大于(底)基层, 促成了面层温度的巨幅波动。这种变化与路面温度场的日变化(图3)很一致。从而表明, 路面温度场可以用单位体积的结构层热量变化来描述。

## 6 结论

(1) 总体上, 沥青路面结构整体在冬季低温处于放热状态、在夏季高温处于吸热及蓄热状态; 且热量变化可以累计, 连续低温时路面会越来越冷, 连续高温时路面会越来越热。

(2) 取单位面积为计算单元时, 沥青路面的放热和吸热主要集中于沥青层和基层, 底基层以下的热量变化不足以影响路面温度场。

(3) 取单位体积为计算单元时, 沥青路面的热交换主要集中于沥青层, (底)基层的热量变化较小; 各结构层单位体积的累计热量变化与路面温度场具有很好的对应性, 可以用热量变化描述路面温度场。

(4) 对于热量的交换速度, 沥青层的热交换速度远大于(底)基层, 促成沥青层温度随气温变化的巨幅波动, 而(底)基层的温度变化相对比较平稳。

(5) 沥青路面各结构层的热量变化, 反映了吸热—放热的交替变化, 对进一步研究路面结构层热力学特性具有重要意义, 如热力疲劳等。

## 参考文献:

### References:

- [1] 延西利, 扈惠敏, 张登良. 沥青混合料线性流变模型的数值模拟[J]. 西安公路交通大学学报, 1999, 19(1): 10-15.  
YAN Xi-li, HU Hui-min, ZHANG Deng-liang. Numerical Simulation for Linear Rheological Model of Bituminous Mix [J]. Journal of Xi'an Highway University, 1999, 19(1): 10-15.
- [2] 延西利, 封晨辉, 梁春雨. 沥青与沥青混合料的流变特性比较[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2002, 22(5): 5-8.  
YAN Xi-li, FENG Chen-hui, LIANG Chun-yu. Comparison of Mechanical Behaviour between Bitumen and Bituminous Mix [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(5): 5-8.

- [3] 周志刚, 傅搏峰. 用粘弹性理论评价沥青混合料的高温稳定性 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (11): 54-56.  
ZHOU Zhi-gang, FU Bo-feng. Applying the Theory of Viscoelasticity to Evaluate Thermal Stability of Asphalt Mixtures [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (11): 54-56.
- [4] 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.
- [5] 康海贵, 郑元勋, 蔡迎春, 等. 实测沥青路面温度场分布规律的回归分析 [J]. 中国公路学报, 2007, 20 (6): 13-18.  
KANG Hai-gui, ZHENG Yuan-xun, CAI Ying-chun, et al. Regression Analysis of Actual Measurement of Temperature Field Distribution Rules of Asphalt Pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20 (6): 13-18.
- [6] 沈金安. 沥青及沥青混合料的路用性能 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001: 338.  
SHEN Jin-an. Road Performances of Asphalt and Asphalt Mixture [M]. Beijing: China Communications Press, 2001: 338.
- [7] 沙庆林. 高速公路沥青路面早期破坏现象及预防 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001: 179-181.  
SHA Qing-lin. Premature Damage and Its Preservative Measures of Bituminous Pavement on Expressway [M]. Beijing: China Communications Press, 2001: 179-181.
- [8] 胡小圆. 沥青路面温度场的测试与分析 [D]. 西安: 长安大学, 2011.  
HU Xiao-yuan. Measurement and Analysis on Thermal Field of Asphalt Pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [9] 白伟. 沥青路面传热性能的试验分析研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.  
BAI Wei. Experimental Analysis of Heat Transfer Characteristics of Asphalt Pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [10] 徐达. 沥青混合料的热传导试验研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.  
XU Da. Experimental Study on Heat Conduction of Asphalt Mixtures [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [11] 资建民, 王海军, 李福宝, 等. 大粒径沥青混合料基层缓解反射裂缝应力分析 [J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2006, 23 (增1): 8-12.  
ZI Jian-min, WANG Hai-jun, LI Fu-bao, et al. Reflection Cracking Resistance Stress Analysis of Large Stone Asphalt Mixtures Base in Asphalt Pavement [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2006, 23 (S1): 8-12.
- [12] SHEN J, AMIRKHANIAN S, MILLER J A. Effects of Rejuvenating Agents on Superpave Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19 (5): 376-384.
- [13] LEE S J, KIM H, AKISETTY C K, et al. Laboratory Characterization of Recycled Crumb Rubber-modified Asphalt Mixture after Extended Aging [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2008, 35 (11): 1308-1317.
- [14] LEE S J, AMIRKHANIAN S N, PUTMAN B J. Characterization of Recycled Aged RAP Binders Containing Crumb Rubber Modifier Using Gel Permeation Chromatography [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, 21 (8): 382-391.
- [15] OTHMAN A M. Impact of Polypropylene Application Method on Long-term Aging of Polypropylene-modified HMA [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22 (10): 1012-1018.
- [16] SHU X, HUANG B, VUKOSAVLJEVIC D. Laboratory Evaluation of Fatigue Characteristic of Recycled Asphalt Mixture [J]. Construction and Building Materials, 2008, 22 (7): 1323-1330.
- [17] 张清平. 沥青路面现场热再生技术研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2011.  
ZHANG Qing-ping. Research on Hot In-place Recycling Technology of Asphalt Pavement [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2011.

(上接第6页)