

文章编号:1671-1637(2013)06-0001-06

基于傅立叶导热定律的沥青混合料热传导试验

延西利¹, 李绪梅², 孙毅³, 徐达¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 新疆交通职业技术学院 道路桥梁工程学院, 新疆 乌鲁木齐 831401;
3. 四川广巴高速公路有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘要:以傅立叶导热定律为基本理论,依据一维稳态导热原理,自行开发了一套双试件平板式热传导试验装置,对3种不同类型的沥青混合料进行了热传导试验,测试了不同试验温度下沥青混合料的导热系数,分析了热传导性能。试验结果表明:沥青混合料的导热系数是一个温变值,随温度的升高而呈线性增加;在相同温度条件下,不同类型沥青混合料的导热系数值相差较小;开发的热传导试验装置稳定可靠,操作简便。

关键词:道路工程;沥青混合料;热传导;导热系数;导热定律;试验装置

中图分类号:U414.75 **文献标志码:**A

Heat conduction experiment of asphalt mixture based on Fourier's heat conduction law

YAN Xi-li¹, LI Xu-mei², SUN Yi³, XU Da¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Road and Bridge Engineering, Xinjiang Vocational and Technical College of Communications, Urumqi 831401, Xinjiang, China;
3. Sichuan Guangba Motorway Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Based on Fourier's heat conduction law and applying the principle of 1-D stable heat conduction, an experimental device in the form of double plane samples for heat conduction was self-developed, and the heat conduction experiments of 3 kinds of asphalt mixtures were done. The heat conductivities of asphalt mixtures at different temperatures were measured, and the heat conductibilities were studied. Experiment result shows that the heat conductivity of asphalt mixture changes with temperature, and increases linearly with the increase of temperature. There is not a great difference among the heat conductivity values of different asphalt mixtures at the same temperature, and the experimental device is stable and easy to handle. 4 tabs, 6 figs, 19 refs.

Key words: road engineering; asphalt mixture; heat conduction; heat conductivity; heat conduction law; experimental device

Author resume: YAN Xi-li (1963-), male, professor, PhD, +86-29-82334434, xili.yan@chd.edu.cn.

0 引言

沥青混合料广泛应用于沥青路面的铺筑,是一

种典型的粘弹塑性材料和颗粒性材料,具有十分显著的温度敏感性^[1-5]。不同的温度条件下,沥青路面的损坏形式也不同,如高温车辙和低温开裂。关于

收稿日期:2013-06-18

基金项目:四川省交通科技项目(2010.2.23);陕西省交通科技项目(12-03K);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011ZD013)

作者简介:延西利(1963-),男,陕西绥德人,长安大学教授,工学博士,从事路面工程与材料流变学研究。

沥青路面传热及温度场的研究,始终是一个永恒的课题。目前,在沥青路面的温度场和温度稳定性方面,国内外学者已开展了大量的研究工作,并取得了一些重要成果^[6-9],但这些成果主要集中于路面温度场和混合料温度稳定性方面,没有从路面结构的热源传递角度展开研究,更没有涉及到沥青混合料的热传导性能研究^[10]。

目前关于材料热传导性能的测试及研究,主要集中于玻璃、塑料、硅胶、树脂、绝热材料、耐火材料等匀质材料^[11],并在冶金行业制定了相关标准规范^[12-14]。由于材料是匀质的,所以试件尺寸一般较小,较小的尺寸不适合于沥青混合料。用于路面铺筑的沥青混合料是大体积堆积材料,属于松散介质体系或称颗粒性材料,结构组成异质,难于用小尺寸试件测试其热传导特性,目前尚无标准测试方法。此外,也有研究把沥青混合料制作成小尺寸试件,应用热线法导热系数仪或类似技术手段^[15],测试了导热系数。姑且不论试件加工的难度,但小尺寸薄片试件从根本上改变了沥青混合料大体积堆积的颗粒性特性,且没有热物理学原理的测试值验证。

在平板法、保护热流计法、瞬变平面热源法、热线法等几种常见的导热系数测定方法中,平板法是目前热物理学界公认准确度最高的方法,可用于基准样品的标定和其他仪器的校准^[11-14]。故本文针对沥青混合料的热传导试验研究尚属空白的情况^[10,15-17],结合沥青路面全厚式温度场实测研究项目^[7,10],应用傅立叶热传导定律和准确度最高的平板法原理,自行设计开发了一套双试件平板式热传导试验装置,并选取3种不同类型的沥青混合料,在不同的温度条件下,进行了热传导试验,测试了沥青混合料的导热系数,分析了沥青混合料的热传导性能,揭示了路面温度场与热传导的关系,为进一步深入认识沥青路面的温度状况和力学行为提供了一种新的基础思路,同时可为规范路面材料导热系数的测试提供技术参考。

1 热传导试验原理

在研究材料的热传导时,最常用的基本定律便是傅立叶导热方程,该方程建立了物体内部温度场与热流场的联系,即

$$q = \frac{Q}{A} = -\lambda \text{grad } T \quad (1)$$

式中: q 为热流密度向量($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); Q 为单位时间导热热量向量(W); A 为垂直于样品热流方向的横截

面积(m^2); λ 为导热系数 $[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$;grad T 为温度梯度向量($\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$)。

需要强调的是:傅立叶导热定律适用于连续温度场内任一点、任一瞬时;热流向量与温度梯度向量是共线的,但方向相反,并且都垂直于等温面;导热系数为材料的固有属性,不随坐标的改变而变化。傅立叶导热定律既考察了材料内部的热传导特性,又提供了导热系数技术指标。

热传导过程分为稳态导热和非稳态导热两种。稳态导热是指物体内部的温度恒定,通过物体横截面的热流量不随时间而变化;非稳态导热是指物体内部温度随着时间不断变化,通过物体横截面的热流量也随时间改变。在现实研究中,经过一定时间的温度稳定,物体内部温度变化相对很小,可以近似认为是稳态导热^[16];同时将导热简化为一维稳态导热,即只在单一坐标方向上存在温度梯度,传热只是按照这一个方向上进行。

按照这样的一维稳态导热原理,本文采用双试件平板式试验研究方案,见图1。在加热板两侧放置2个完全相同的试件(左试件和右试件),加热板产生的热量均匀地向两侧试件传递,并在试件内部形成温度梯度,在单位时间内传递的总热量 Q 为

$$Q = Q_z + Q_y = \lambda A \frac{T_{zn} - T_{zw}}{\delta} + \lambda A \frac{T_{yn} - T_{yw}}{\delta}$$

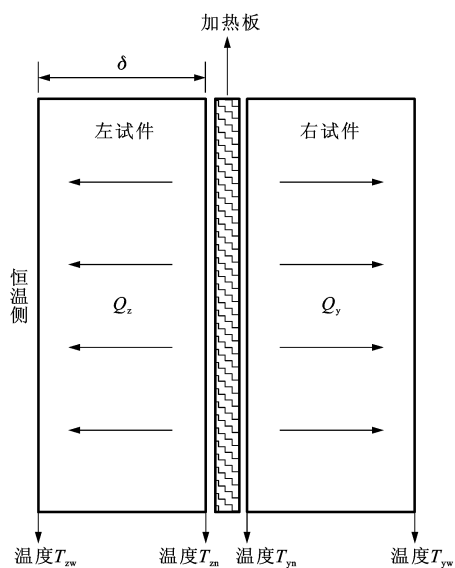


图1 一维稳态热传导试验原理

Fig. 1 Experiment principle of 1-D stable heat conduction

导热系数为

$$\lambda = \frac{Q\delta}{A(T_{zn} - T_{zw} + T_{yn} - T_{yw})} \quad (2)$$

式中: δ 为试件厚度(m); T 为试件内侧面或外侧面的平均温度($^{\circ}\text{C}$);下标 z 、 y 分别表示左试件、右试件;下标 n 、 w 分别表示试件的内侧(加热侧)、外侧(恒温侧);对下标的组合,如 T_{zw} 为左试件外侧面的平均温度, Q_y 为通过右试件的热量。

试验研究中,在判定或识别试验达到稳态热传导后,通过控制1 h的电能来核算式(2)中的单位时间热量,通过布设在试件2个侧面的若干个温度传感器的平均值来核算各个侧面的温度。

2 试验装置的设计

按照上述热传导试验原理,本文自行设计开发了一套双试件平板式试验装置,采用沥青混合料车辙板试件($300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 50\text{ mm}$)。试验时,将2块完全相同的沥青混合料车辙板放置在加热板的左右两侧,同时进行热传导试验(图2)。

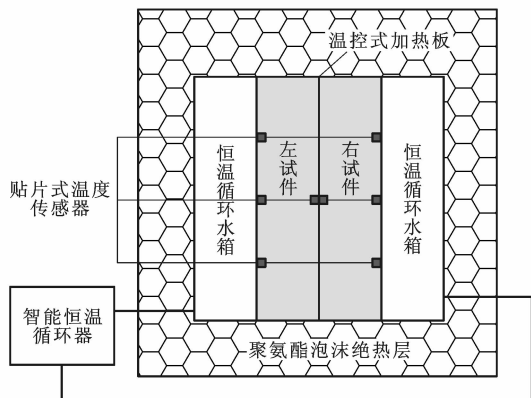


图2 试验装置设计

Fig.2 Design of experimental device

试验装置主要由三部分组成:加热板及控温系统,此系统包括温控式加热板、智能恒温循环器及控制系统,为进行热传导试验提供热源与稳定温差,加热板的温度控制范围为($0\sim 150$) $^{\circ}\text{C}$,功率偏差为 $\pm 5\%$,智能恒温循环器的温度控制范围为($-10\sim 99$) $^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$;温度测定系统,此系统由贴片式温度传感器、数据采集仪、电脑及软件组成,主要用于测量试件2个侧面的表面温度,双试件双面共布设16个温度传感器,测试范围为($-60\sim 250$) $^{\circ}\text{C}$,测试精度为($\pm 0.1+0.002|t'|$) $^{\circ}\text{C}$, t' 为实测温度,数据采集仪共有16个数据通道,可直接与电脑通讯;试件绝热室系统,此系统由试验箱、聚氨基酯泡沫绝热层与石棉保温层组成,为热传导试验提供一个封闭的与外界隔离的温度环境,试验箱的外观尺寸为 $61\text{ cm}\times 61\text{ cm}\times 61\text{ cm}$,试件周边的绝热层最小厚度为13 cm。

通过对以上3个组成部分的整体安装与调试,即完成双试件平板式热传导试验装置的开发,见图3。



图3 试验装置

Fig.3 Experimental device

3 试验研究方案

考虑到不同沥青种类、集料岩石类型及级配类型对沥青混合料热传导性能的影响,采用3种不同类型的沥青混合料(表1)制作了车辙板试件,开展了沥青混合料的热传导试验研究。车辙板试件的几何尺寸为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 50\text{ mm}$,关于沥青、集料及其混合料的技术性能详见文献[11]。

表1 沥青混合料

Tab.1 Asphalt mixtures

混合料种类	混合料 A	混合料 B	混合料 C
混合料类型	AC-16	AC-20	AC-20
沥青种类	壳牌 90#	SK90#	SBS 改性沥青
岩石种类	玄武岩	石灰岩	石灰岩

本文的依托工程为四川省广元至巴中高速公路,通过路面温度场的现场实测研究^[7],得知该高速公路高温期的路面内部温度变化为($23\sim 58$) $^{\circ}\text{C}$,因此,在制定试验研究方案时,设定加热板的控制温度为20、30、40、50、60 $^{\circ}\text{C}$ 。对于外侧恒温控制,宜考虑试验时的自然气温,当加热温度设定为20 $^{\circ}\text{C}$ 时,恒温循环器的控制温度设为5 $^{\circ}\text{C}$,其他加热温度下,恒温循环器的控制温度设为15 $^{\circ}\text{C}$ 。试验加热控温条件见表2。

表2 试验加热控温条件

Tab.2 Heating condition of experiment $^{\circ}\text{C}$

内侧加热	20	30	40	50	60
外侧恒温	5	15			

另外,试件两侧表面的温度测试采用了贴片式温度传感器。试验时,电脑显示温度变化,数据采集仪自动采集储存。温度传感器在试件的加热侧(内侧)布设了 3 个,恒温侧(外侧)布设了 5 个,布设方案考虑了 3 个因素:试件传热面的几何对称性、外侧温度可能比内侧不均匀以及边界效应,数据采集仪的通道数量共有 16 个。试件表面的温度传感器(S_i)布置方案见图 4。通过分析温度测试结果,对于试件任一侧面上不同位置的传感器,其测试温度的最大差值均小于 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,表明车辙板试件传热面上的温度分布是均匀的^[10]。

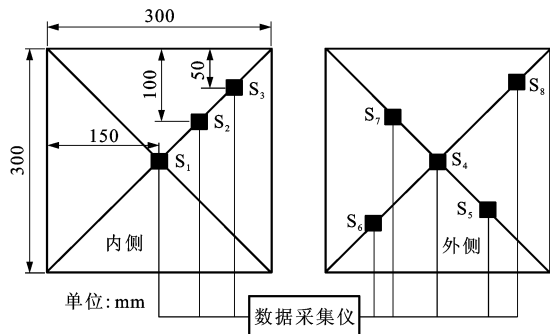


图 4 温度传感器布置

Fig. 4 Arrangement of temperature sensors

4 试验技术要点

进行热传导试验时,试件的一侧由加热板进行加热(内侧),另一侧由智能恒温循环器进行恒温控制(外侧),并使试件逐渐达到一维稳态热传导。试验过程中,需要强调以下 4 项技术要点。

(1)试验温度的控制。加热板和恒温循环器均配有数字温度控制器,或单体或面板,试验时按照加热控温方案(表 2)预先设定。

(2)温度数据的采集。试验采用贴片式温度传感器对试件表面温度进行测量,并通过数据采集仪进行数据采集与存储,同时在电脑显示器上可实时显示。利用式(2)进行计算分析时,取试件内侧 3 点、外侧 5 点(图 4)的实测温度平均值。

(3)稳态导热的判定。稳态热传导的判定是试验研究的关键,根据试验装置的技术配置,本文提出必须同时满足的 2 个判定条件:对于内侧加热面,共有 6 个温度传感器,加热时温度迅速升高,而后随时间呈周期性上下波动,波动幅度较小且基本相同,任意 2 个周期内的最大值之差和最小值之差都不超过 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;对于外侧恒温面,共有 10 个温度传感器,连续多个时间点的温度最大差值不超

过 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,此时温度曲线与时间轴基本平行,在图 5 中,当时间 $t \geq t_0$ 时,试件内部达到稳态热传导。在图 5 中, T_n 、 T_w 曲线分别叠合了 6、10 个温度传感器的测试值。

试验时,可通过电脑实时温度窗口初步判定导热稳定与否,然后根据实测温度数据的简单计算进行确认,最终判定试验是否达到稳态热传导。

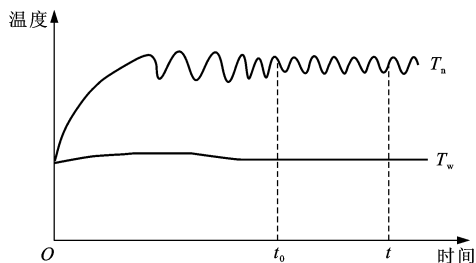


图 5 稳态热传导的判定

Fig. 5 Identification of stable heat conduction

(4)热量的取值。本试验装置采用的加热板为纯电阻元件,其消耗的电能全部转化为热量^[6,11]。式(2)中的热量 Q 取值等价于单位时间的电能消耗。在图 5 中,当时间 $t \geq t_0$ 时,试件内部达到稳态热传导,若取 $\Delta t = t - t_0 = 1\text{ h}$ (单位时间),则此时间段所消耗的电能即为热量 Q 。试验时,当判定热传导达到稳态后,即开启数字式电表,测量 1 h 内加热板所消耗的电能。

5 试验结果分析

应用自行设计开发的双试件平板式热传导试验装置,按照试验研究方案(表 1、2),对 3 种不同类型的沥青混合料进行了热传导试验。当试验达到稳态热传导后,测定 1 h 内所消耗的电能,即单位时间稳态热传导的热量 Q ,如表 3 中的 Q_A 、 Q_B 、 Q_C ,下标 A、B、C 表示 3 种沥青混合料。同时对试件 2 个侧面的温度进行实测与分析^[10],并计算每个侧面的平均温度。最后,利用式(2)计算得到不同试验温度下不同沥青混合料的导热系数值,并分析了其相对误差(表 4)。导热系数的变化规律见图 6。

表 3 单位时间内稳态热传导的热量

Tab. 3 Heat conduction quantity per hour in stable state

$T_n / ^{\circ}\text{C}$	Q_A / W	Q_B / W	Q_C / W
20	49	55	54
30	56	73	85
40	106	128	131
50	174	181	183
60	251	254	257

表4 导热系数的计算结果

Tab. 4 Calculated results of heat conductivity

加热温度/ ℃	导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]				相对误差/%		
	混合料A	混合料B	混合料C	平均值	混合料A	混合料B	混合料C
20	1.17	1.07	1.13	1.12	4.15	-4.75	0.59
30	1.33	1.13	1.22	1.23	8.42	-7.88	-0.54
40	1.49	1.25	1.34	1.36	9.56	-8.09	-1.47
50	1.70	1.37	1.54	1.54	10.63	-10.85	0.22
60	1.90	1.59	1.73	1.74	9.20	-8.62	-0.57

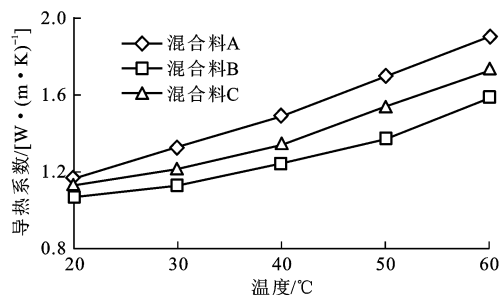


图6 导热系数与温度的关系

Fig. 6 Relations between heat conductivity and test temperature

由表3可以看出,试验加热温度升高时,沥青混合料的热传导量大幅增加,也即表明,为了保证加热一侧的温度恒定,必须要提供一定量的脉冲热量,从而保证试件内部稳定的温度梯度。此外,在相同的试验温度下,不同沥青混合料的热传导量相差不是很显著。

由图6可以看出,沥青混合料的导热系数是一个温变值,随着试验温度的升高大致呈线性增大,在(20~60)℃的温度范围内,导热系数介于1.07~1.90 W·(m·K)⁻¹之间;对于不同类型的沥青混合料,由于粒径粗细、级配类型、岩石性质、沥青品质等因素的技术差异,似乎应该对导热系数有一定影响,但综合考察所选3种沥青混合料的导热系数值,发现彼此虽略有差异,但差别较小,最大相对误差约为10%,且不具有规律性。但混合料的剩余空隙率是一个重要影响参数^[15,18-19],有待下一步研究。

依据传热学理论,材料导热系数随温度变化的规律可以近似地假定为如下线性关系

$$\lambda = \lambda_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (3)$$

式中: T_0 为某一参考温度; λ_0 为温度为 T_0 时的导热系数; α 为常数,为 λ 随温度 T 的变化率。由图6可知, λ 随 T 升高而增大,此时 α 为正值。通过简单的数值计算分析,沥青混合料导热系数的试验结果大致服从式(3)规律。

针对若干种不同类型的沥青混合料,有些研究

人员还应用热线法导热系数快速测定仪进行了导热系数测试^[15],其试验结果也表明,不同沥青混合料的导热系数值相差很小,几近一致,导热系数随试验温度的升高也呈线性增加。

最后需要说明的是,平板法是目前热物理学界公认准确度最高的方法,该方法的取值条件或考察条件是稳态热传导过程,所以试件内部的温度分布(温度场)必然是线性的。

6 结 语

(1)本文依据一维稳态导热原理,自行开发了双试件平板式热传导试验装置,使用状态稳定可靠,精度优良,操作简便,可用于其他大体积堆积的土工材料。

(2)沥青混合料的导热系数是一个温变值,随温度的升高而呈线性增加,在(20~60)℃的温度范围内,导热系数介于1.07~1.90 W·(m·K)⁻¹之间。

(3)对于不同类型的沥青混合料(岩石、沥青、级配),在相同的试验温度条件下,其导热系数值相差较小,且不具有规律性。

(4)沥青路面在夏季高温时,由于面层材料导热系数的温变特性,加速了路面的热量传递,使得沥青层内部的温度升高速率加快,恶化了沥青路面的高温状态。

下一步需开展不同类型沥青混合料和路面基层材料及其结构组合的系统研究,进一步深入分析沥青路面的温度场。

参考文献:

References:

- [1] 张占军,闵召辉,黄卫.不同交联度环氧沥青混合料低温弯曲性能研究[J].中国公路学报,2012,25(1):35-39.
ZHANG Zhan-jun, MIN Zhao-hui, HUANG Wei. Research on bending performances of epoxy resin asphalt mixes with different crosslink densities at low temperatures[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(1): 35-39. (in Chinese)
- [2] 赵延庆,刘慧,白龙,等.沥青混合料本构关系对路面力学响应的影响[J].中国公路学报,2012,25(5):6-11.
ZHAO Yan-qing, LIU Hui, BAI Long, et al. Effect of constitutive relationship of asphalt mixture on pavement response[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(5): 6-11. (in Chinese)
- [3] 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):7-12.
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): 7-12. (in Chinese)
- [4] 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. (in Chinese)
- [5] 尹利华, 延西利, 陈晓瑛. 沥青材料感温性与其混合料高温稳定性关系研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(1): 38-42.
YIN Li-hua, YAN Xi-li, CHEN Xiao-ying. Study of relation between asphalt temperature susceptibility and its mixture high temperature stability [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(1): 38-42. (in Chinese)
- [6] 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 fields in asphalt pavement[D]. Changsha: Hunan University, 2004. (in Chinese)
- [7] 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. Measure and analysis on thermal field of asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [8] 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. (in Chinese)
- [9] LUCA J, MRAWIRA D. New measurement of thermal properties of superpave asphalt concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(1): 72-79.
- [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 the heat conduction of asphalt mixtures[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [11] 闵 凯, 刘 斌, 温 广. 导热系数测量方法与应用分析[J]. 保鲜与加工, 2005, 5(6): 35-38.
MIN Kai, LIU Bin, WEN Guang. Application of measuring method of thermal conductivities[J]. Storage and Process, 2005, 5(6): 35-38. (in Chinese)
- [12] YB/T 4130—2005, 耐火材料 导热系数试验方法(水流量平板法)[S].
YB/T 4130—2005, refractory materials—determination of thermal conductivity (calorimeter)[S]. (in Chinese)
- [13] GB/T 10294—2008, 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定(防护热板法)[S].
GB/T 10294—2008, thermal insulation—determination of steady-state thermal resistance and related properties—guarded hot plate apparatus[S]. (in Chinese)
- [14] ASTM E 1530—06, standard test method for evaluating the resistance to thermal transmission of materials by the guarded heat flow meter technique[S].
- [15] 邹 玲. 沥青混合料热物性参数研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
ZOU Ling. Research on thermal physical parameters of asphalt mixture[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [16] 吴建良, 孙立军. 路面非周期一维温度场的傅里叶级数解[J]. 中国公路学报, 2012, 25(1): 29-34, 46.
WU Jian-liang, SUN Li-jun. Fourier series solution of non-periodic 1-D temperature field of pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(1): 29-34, 46. (in Chinese)
- [17] 冯德成, 李兴海, 郭大进, 等. 基于热物理特性的沥青混合料的研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(3): 28-33.
FENG De-cheng, LI Xing-hai, GUO Da-jin, et al. Research of asphalt mixture based on thermophysical property[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(3): 28-33. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] 高子渝, 焦生杰. 微波加热旧沥青混合料的应用研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2006, 23(10): 29-31.
GAO Zi-yu, JIAO Sheng-jie. Research on application of microwave in recycled asphalt mixture's heating[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2006, 23(10): 29-31. (in Chinese)