

半刚性基层沥青路面的热传导试验特性

延西利¹,艾 涛²,游庆龙¹,张祎茹¹,王利娟¹

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 长安大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710061)

摘 要:为了深化认识半刚性基层沥青路面的温度场及热力学特性,针对大体积堆积材料的结构组成特性,应用基于傅里叶(Fourier)热传导原理开发的“双试件平板式”热传导试验装置,结合实体工程的路面结构和温度场,制备了 6 种不同配比的水稳基层材料和 4 种不同类型的沥青面层材料,设定了不同的试验控制温度,测试了水稳混合料和沥青混合料的导热系数,分析了半刚性基层沥青路面的热传导性能。研究表明:沥青混合料和水泥稳定碎石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态势;密级配沥青层的导热系数值为 $1.03 \sim 2.10 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,密实结构水稳层的导热系数值为 $1.03 \sim 1.60 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,前者略大于后者,说明沥青层总体上比水稳层具有更好的导热性能;相同温度条件下,密级配沥青混合料的导热系数值明显大于开级配类型,差别在 $0.33 \sim 1.84 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 之间,说明空隙率的影响较大;相同级配类型时,粗粒式沥青混合料的导热系数值大于细粒式,表明石料的传热贡献较大;影响半刚性基层沥青路面导热系数的前提因素是材料种类,影响同类材料的关键因素,首先是空隙率,其次是粒径;沥青路面的热传导通常处于瞬态而非稳态。

关键词:道路工程;半刚性基层沥青路面;热传导;导热系数;试验特性

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

Experimental characteristics of heat conduction of semi-rigid base asphalt pavement

YAN Xi-li¹, AI Tao², YOU Qing-long¹, ZHANG Yi-ru¹, WANG Li-juan¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: In order to deepen the understanding of the temperature field of semi-rigid base asphalt pavement and its thermo-mechanic characteristics, by using an experimental device in type of double plane samples for heat conduction developed in laboratory applying the Fourier's law, and by considering the structural characteristics of an accumulative material in great volume, 6 kinds of cement treated aggregates mixture and 4 kinds of bituminous mixtures were studied to measure the thermal conductivity in different temperatures, and to analyze the heat conductive behavior of asphalt pavement. The results show that the thermal conductivity of cement treated aggregates mixture and bituminous mixtures increases linearly with the augment of temperature; the thermal conductivity of dense-graded asphalt layers is $1.03 \sim 2.10 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, while the thermal conductivity of dense-graded cement treated aggregates layers is $1.03 \sim 1.60 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, thus bituminous mixture has a better thermal conductive property than cement treated

aggregates. Dense-graded mixture is better about $0.33 \sim 1.84 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ than open-graded under the same temperature condition, which indicates that void ratio of materials is a key impact factor; the thermal conductivity of coarse-grained is larger than that of small-grained in the same base type, demonstrating that the aggregates contribute a lot to heat conduction; the material type is crucial for the thermal conductivity of semi-rigid base asphalt pavement, and the first factor influencing the conductivity for the same material is the void ratio and the second is the grain size, and that the pavement heat conduction is usually in transient state but not in steady state. 6 tabs, 5 figs, 20 refs.

Key words: road engineering; semi-rigid base asphalt pavement; heat conduction; thermal conductivity; experimental characteristic

0 引言

半刚性基层沥青路面目前仍然是一种最主要的路面结构形式,且大多数以水泥稳定碎石混合料作为基层,简称水稳基层。本文结合实体工程沥青路面的结构形式和温度场,开展水稳基层和沥青面层的热传导试验研究,其目的在于:①强化沥青路面热力学特性研究;②应用热传导理论,深化认识半刚性基层沥青路面的温度场;③对于大体积堆积材料,提供一种导热系数测试方法;④基于材料的热传导性能,进一步优化建立路面温度场的数值模型。目前,国内外关于沥青路面的热力学研究,主要集中于路面温度场和温度稳定性方面,较少涉及路面结构的热传导性能,本课题组近几年在这方面开展了一些研究工作^[1-11]。

关于材料热传导性能的测试及研究,主要集中于玻璃、硅胶、绝热及耐火材料等匀质材料,并形成了一系列的标准规范^[12-14]。由于材料是匀质的,所以试件尺寸一般较小,如 $\Phi 100 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的圆片,显然这样小的尺寸不适合于路面材料。目前对路面材料尚无标准测试方法。此外,在几种常见的导热系数测定方法中,如平板法、保护热流计法、瞬变平面热源法、热线法等,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^[10]。

对于颗粒性、大体积堆积的路面材料的热传导试验方法,笔者已作了具体阐述,并着重介绍了自主开发的“双试件平板式”热传导试验装置^[9-11]。该试验装置的开发,具有这样 3 个特点:①应用了傅里叶热传导定律和准确度最高的平板法原理;②考虑了大体积堆积材料的结构组成特性;③充分利用了现有的试件成型平台,以标准车辙板试件作为热传导试验的导热平板。

半刚性基层沥青路面热传导性能的简化模式实质上就是基层材料和面层材料的热传导。本文结合实体工程的路面结构及其温度场,选用了不同类型的水稳基层材料和沥青面层材料,应用“双试件平板式”热传导试验装置,在不同温度(或温度梯度)条件下,进行了热传导试验,测试了导热系数,分析了半刚性基层沥青路面的热传导性能,为进一步优化建立沥青路面温度场的数值模型提供基础数据,同时为规范路面材料导热系数的测试提供技术参考。本文直接应用傅里叶热传导定律和平板原理,首次测试了半刚性基层沥青路面结构层的导热系数,并通过热传导原理分析了沥青路面的温度场,具有重要的技术价值。

1 试验测试原理

本文采用自主开发的“双试件平板式”热传导试验装置,基本原理为:以 2 块完全相同的车辙板试件($300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$)作为导热平板,紧密放置在加热板的左右两侧,同时进行热传导试验,详见文献^[9-10]。常用的热传导基本定律是傅里叶热传导方程,即

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

式中: \mathbf{q} 为热流密度向量(W/m^2); \mathbf{Q} 为单位时间导热量向量(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 $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$; $\text{grad} \mathbf{T}$ 为温度梯度向量(K/m)。

试验装置主要由加热及控温系统、温度测定系统和试验箱绝热系统三部分组成。试验过程中,经过一定时间的温度稳定,试件内部的温度变化相对很小,可以近似认为是稳态导热^[15-16]。此时,根据式(1),左右 2 块板单位时间传递的总热量为

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

由此得到导热系数为

$$\lambda=\frac{Q\delta}{A[(T_{zn}-T_{zw})+(T_{yn}-T_{yw})]} \quad (3)$$

式中: Q_z 、 Q_y 分别为通过左、右试件的热量; T_{zn} 、 T_{zw} 分别为左试件内、外侧面的平均温度(℃)、 T_{yn} 、 T_{yw} 分别为右试件内、外侧面的平均温度(℃); δ 为试件厚度(m)。

试验研究中,在判定或识别试验达到稳态热传导后,通过记录 1 h 的电能来核算式(3)中的单位时间热量 Q ,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,从而按照式(3)计算得到材料的导热系数。

2 试验研究方案

试验研究方案的制定,关键是选择试验材料和设定试验温度。材料的选择首先应用了实体工程的路面材料,其次考虑了常用的一些路面材料;温度的设定以实体工程沥青路面的实测温度场为基准,充分考虑路面通常的工作温度而取整设定。

2.1 路面结构及实测温度

实体工程为四川省广巴(广元—巴中)高速公路,路线全长 121 km,设计车速 80 km/h,双向 4 车道,水稳基层沥青路面,如图 1 所示。路段位于四川盆地北缘,行政区域隶属广元市元坝区和旺苍县、巴中市南江县和巴州区,地理坐标东经 105°44′~106°45′,北纬 31°49′~32°27′。地貌形态上,从元坝到旺苍到巴中依次为微丘区、过渡区、山岭区。沿线年平均气温 15℃,极端最低气温 -8.2℃、极端最高气温 39.7℃;雨量丰沛,年降雨量 607.1~1 845.2 mm。

在实体工程的路面铺筑过程中,路面各结构层之间埋设了温度传感器,利用数据采集仪实现数据采集与存储,全天候连续 2 年实测了路面温度场^[1,7]。综合分析路面温度的连续变化,得到各结构层之间在高温期温度(T_h)和低温期温度(T_c)变化范围,如图 1 所示。

2.2 试验材料及试验温度

针对半刚性基层沥青路面的热传导,试验材料分为水稳基层材料和沥青面层材料,试验材料的选择主要考虑了 3 个因素:一是应用了上述实体工程的路面材料;二是参照了《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006)推荐的其他常用路面材料^[17];三是考虑了不同材料的骨架空隙结构。所选用的试验材料见表 1,并按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)制作成几何尺寸为 300 mm×300 mm×50 mm 的车辙板试件^[18]。水稳混合料车

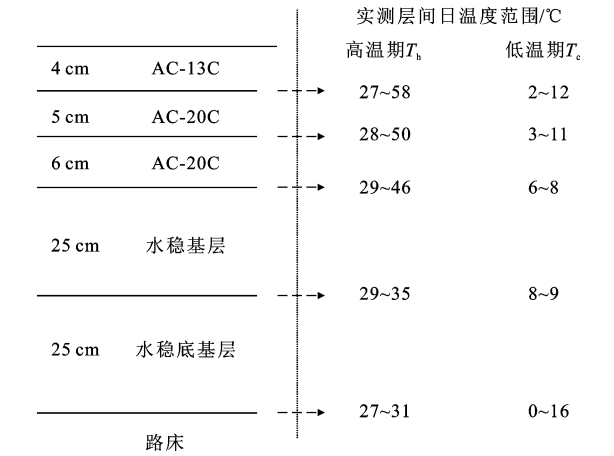


图 1 实体工程的路面结构及层间温度范围
Fig. 1 Pavement structure of entity engineering and temperature range at interlayers

辙板按规定养生 7 d 后,与沥青混合料车辙板一起静置了至少 30 d 后进行热传导试验。试验材料的基本技术性能详见文献[19-20]。

表 1 用于热传导试验的路面材料种类
Tab. 1 Kinds of pavement materials used in heat conduction experiment

沥青面层 (共 4 种)	沥青种类	SBS 改性	70# 基质
	混合料类型	AC-13	AC-20
		SMA-13 OGFC-13	
水稳基层 (共 6 种)	结构类型	悬浮密实型,骨架密实型	
	水泥剂量/%	3.5,4.0,4.5	

进行热传导试验时,通常保持“试验平板”的一侧温度恒定,而调节变化另一侧的温度,形成温度梯度,如下页图 2 所示。图 2 中虚线的上下两部分对应 2 种试验操作;根据室温条件,分别取用“内侧加热、外侧恒温”和“内侧恒温、外侧加热”的控制方式。试验控制温度分为恒控温度 T_0 和调控温度 T_t 。恒控温度 T_0 设定为 20℃,主要考虑了 3 个因素:一是科学试验定义的室温为 20℃;二是试验操作时实验室温度约 18℃~20℃;三是沥青路面的工作温度大多为常温。调控温度 T_t 的选择见下页表 2,主要考虑了实体工程路面的实测温度(图 1),并拓展到冰点以下一定范围。

3 水稳基层的热传导性能

在现行沥青路面设计规范中,水稳基层混合料的最大粒径为 31.5 mm,级配类型分为悬浮密实型和骨架密实型 2 种,推荐水泥剂量 3%~6%^[17]。本文参照了实体工程的水泥剂量 3.8%~4.4%,设定

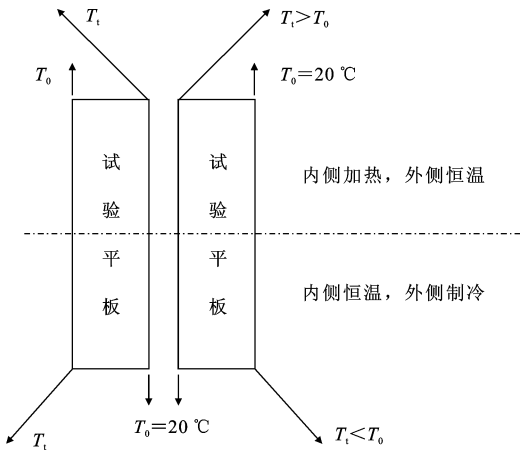


图 2 热传导试验的温度控制方式

Fig. 2 Control mode of temperature for heat conduction experiment

了 3 个水泥剂量,并针对 2 种级配类型,组合成 6 种水稳混合料(表 1),用于本次热传导试验,其设定的种类代号及 7 d 无限限抗压强度值见表 3。

表 2 热传导试验的温度控制条件

试验温度控制		高温期	低温期
沥青面层	实测温度/℃	27~58	0~16
	调控温度/℃	60,50,40,30	10,5,0,-5,-10
	恒控温度/℃	20	
水稳基层	实测温度/℃	27~46	3~11
	调控温度/℃	45,40,35,30,25	10,5,0,-5
	恒控温度/℃	20	

表 4 不同调控温度下水稳基层传递的热量及导热系数值

种类代号		不同调控温度(℃)下单位小时传递的热量 Q/W									不同调控温度(℃)下导热系数 λ/(W·(m·K) ⁻¹)								
		-5	0	5	10	25	30	35	40	45	-5	0	5	10	25	30	35	40	45
XF3.5		88	76	57	42	23	47	68	89	118	1.11	1.16	1.20	1.27	1.37	1.39	1.44	1.48	1.55
XF4.0		94	81	64	44	25	47	70	97	122	1.16	1.21	1.28	1.33	1.40	1.44	1.47	1.53	1.59
XF4.5		96	82	63	45	25	48	71	96	122	1.17	1.22	1.25	1.30	1.37	1.43	1.48	1.55	1.60
GJ3.5		82	70	55	41	23	45	66	85	107	1.03	1.06	1.11	1.13	1.22	1.27	1.33	1.37	1.43
GJ4.0		91	79	62	42	23	45	70	93	119	1.07	1.12	1.18	1.21	1.30	1.32	1.39	1.43	1.48
GJ4.5		90	75	60	41	24	44	65	89	112	1.09	1.13	1.19	1.22	1.28	1.30	1.37	1.41	1.47

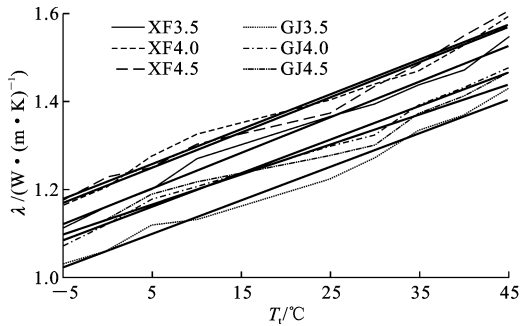


图 3 水稳基层的导热系数随调控温度的变化

Fig. 3 Variation of thermal conductivity with control temperatures for bases treated by cement

表 3 不同类型水稳基层的分析代号

Tab. 3 Kind labels of different bases treated by cement

结构类型	水泥剂量/%	种类代号	强度/MPa
悬浮密实型	3.5	XF3.5	3.69
	4.0	XF4.0	4.06
	4.5	XF4.5	4.27
骨架密实型	3.5	GJ3.5	3.87
	4.0	GJ4.0	4.22
	4.5	GJ4.5	4.48

按照第 1 节介绍的方法,实测单位小时的电功率所表征导热量 Q ,并利用式(3)计算导热系数,结果见表 4。导热系数 λ 随调控温度 T_i 的变化如图 3 所示,由此可以看出:①水稳基层的导热系数随试验温度的升高而增大,基本上呈线性增长态势,且不同种类水稳基层的增长速率基本相同;②悬浮密实型水稳基层的导热系数值比骨架密实型约大 0.10 W/(m·K),说明结构较为致密的水稳混合料具有较强的导热性能;③增加水泥剂量时,导热系数值也随之增大,但当剂量达到一定程度时,差别会变小,最大相对误差小于 5%。

回归分析发现,不同种类水稳基层材料的 $\lambda-T_i$ 直线大致相互平行,仅有剪距 λ_0 值不同(图 3),判定系数 R^2 为 0.97~0.99, $\lambda-T_i$ 的回归直线为^[19]

$$\lambda=\lambda_0+0.007\,7T_i\tag{4}$$

式中: λ_0 为 1.06~1.22 W/(m·K); T_i 为试验时的

调控温度即试验温度(℃)。

实际应用中,当水泥剂量较小和(或)采用骨架密实结构时 λ_0 可取低值;反之取高值。在试验温度范围内,常用水稳基层的导热系数测试值相对比较稳定,不随结构类型发生较大变化(见表 4),取值在 1.03~1.60 W/(m·K)之间。

4 沥青面层的热传导性能

在现行沥青路面技术中,表面层通常采用细粒式沥青混合料且大多加以改性,(中)下面层采用中粒式沥青混合料,如图 1 所示的实体工程亦是如此,

故本次用于热传导试验的沥青混合料共选择了 4 种,其沥青用量和剩余空隙率见表 5。

表 5 沥青混合料的沥青用量和空隙率

混合料种类	AC-13	SMA-13	OGFC-13	AC-20
沥青用量/%	4.8	6.1	5.0	4.2
空隙率/%	4.7	3.8	19.0	4.8

与上述水稳基层同理,不同沥青混合料单位小时导热量 Q 的实测值及导热系数的计算值分别列于表 6 中,并绘制了 $\lambda-T_i$ 关系如图 4 所示。分析试验结果发现:①沥青面层的导热系数随试验温度的升高而增大,且大致呈线性增长态势,不同沥青混合料基本上具有相同的增长速率;②级配、大空隙类混合料 OGFC 的导热系数明显较小,比 AC-13 约小 0.33~0.53 W/(m·K),表明空隙的影响是显著的、重要的;③连续密级配类混合料 AC-13 和 AC-20,

表 6 不同调控温度下沥青面层传递的热量及导热系数值

Tab. 6 Heat conduction quantity and thermal conductivity of asphalt layers at different control temperatures

混合料种类	不同调控温度(℃)下单位小时传递的热量 Q/W									不同调控温度(℃)下的导热系数 λ/(W·(m·K) ⁻¹)								
	-10	-5	0	5	10	30	40	50	60	-10	-5	0	5	10	30	40	50	60
AC-13	93	82	68	53	39	42	93	149	226	1.03	1.04	1.06	1.08	1.15	1.30	1.45	1.59	1.78
SMA-13	98	84	72	55	39	43	93	149	226	1.11	1.14	1.19	1.20	1.27	1.43	1.52	1.67	1.82
OGFC-13	60	52	44	34	25	27	61	100	147	0.70	0.71	0.73	0.73	0.81	0.90	0.99	1.12	1.26
AC-20	90	77	64	50	34	38	86	142	207	1.31	1.36	1.43	1.44	1.56	1.67	1.79	1.94	2.10

关于沥青用量的影响,需要说明的是,沥青混合料通常需要按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)进行配合比设计,确定最佳沥青用量^[18]。在其工程应用范围内,沥青用量的变化幅度一般较小,对沥青面层导热系数的影响不具有规律性或影响较弱^[9-10],因此对于沥青混合料的 2 大组成要素——矿料级配(最大粒径、空隙率)和沥青用量而言,从试验结果来看,决定导热系数的首要内在因素是空隙率;其次是粒径,而沥青用量的影响极小,唯一的外在因素便是温度。

同时回归分析发现,不同种类沥青面层材料的 $\lambda-T_i$ 直线大致相互平行,仅有剪距 λ_0 值不同(图 4),判定系数 R^2 为 0.96~0.98, $\lambda-T_i$ 的回归直线为^[20]

$$\lambda=\lambda_0+0.009\ 7T_i$$

(5)

式中: λ_0 取 0.73~1.43 W/(m·K); T_i 为试验时的调控温度(℃)。

实际应用中,宜区分密级配和级配 2 种情况:对于密级配沥青混合料,式(5)中的 λ_0 为 1.06~1.43 W/(m·K),当粒径较小和(或)空隙率较大时 λ_0 可取低值,反之取高值,该类沥青混合料的 λ 取值

矿料粒径越大,导热系数也越大,说明了矿料的导热性能强于沥青胶浆;④对于同粒径密级配类的沥青混合料,AC-13 的空隙率大于 SMA-13,其导热系数偏小约 0.10 W/(m·K)。

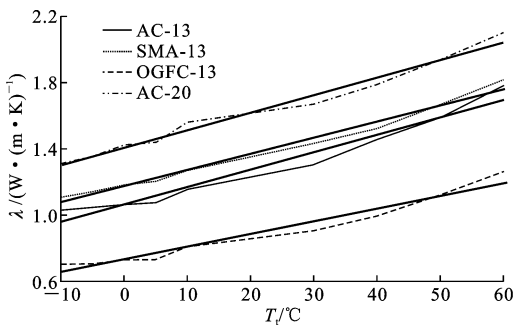


图 4 沥青面层的导热系数随调控温度的变化

Fig. 4 Variation of thermal conductivity with control temperature for asphalt layers

为 1.03~2.10 W/(m·K);对于级配沥青混合料,常用于表面层的是 OGFC-13,此时 $\lambda_0 \approx 0.73$ W/(m·K), λ 取值为 0.70~1.26 W/(m·K)。

5 沥青路面的热传导机理

导热系数值的大小,反映了路面材料乃至结构的热传导性能,热传导效应最终形成的是路面温度场。实体工程路面的实测温度场的基本状况是:夏季高温期最热时段,路面处于吸热状态,沥青层温度很高,在水稳基层内逐渐衰减至路床内趋于稳定;冬季低温期最冷时段,路面处于放热状态,沥青层温度很低,在水稳基层内逐渐升高至路床内趋于稳定。详细内容见文献[1],示意图如下页图 5 所示。不管是高温期还是低温期,热量总是从路面结构的温度较高一侧传导至温度较低一侧。需要强调的是,沥青路面的这种热传导是瞬态的而非稳态,瞬态温度分布在传热的几何方向上呈曲线(图 5 中 ABC),稳态则为直线(图 5 中 AC)。

如前所述,利用一维稳态热传导原理,通过试验测试半刚性基层沥青路面材料的导热系数和分析其热传导性能,得到以下 2 点分析原则:①热量与温度的等效原则,即路面结构的温度可以用热量来描述,

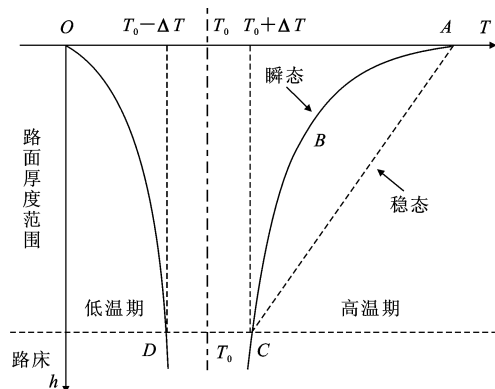


图5 实体工程路面温度场的热传导分析示意

Fig. 5 Heat conduction analysis schematic of pavement temperature field of entity engineering

从而在分析温度场时引入热传导的热量概念^[1,7-8];

②热传导性能的温变原则,即路面材料的导热系数值随温度的升高而增大,说明热传导时路面材料的温度热时更热、冷时更冷。

路面暴露于自然环境中,路表温度(或热量)交替变化,路床温度(或热量)相对稳定,在路面深度方向上可视为一维瞬态热传导。如图5所示,沥青路面在高温期最热时段的温度场分布如ABC曲线,沥青层的温度较高,热传导性能又热时更强,加剧了吸热,使得沥青层比水稳基层具有更高的温度,表现为强烈的瞬态热传导曲线;直至进入底基层后,随着热量传递的减小,吸热量也减少,与路基的温度梯度减小,温度场分布逐渐缓和乃至平稳。另外一种极端情况或不可能出现的情况是,路面热传导由瞬态转变为稳态,即图5中的ABC曲线逐渐趋近于AC直线,此时路面需要长时间的大量吸热蓄热,路面达到最不利的极端高温状态。

在低温期最冷时段,路面温度场的分布在理论上与高温期分布一致,只是曲线的弯曲方向相反,并以图5中的 T_0 为轴对称。但由于低温期路表温度变化的边界条件不同,即变化幅度较小(实体工程路表温度约 $0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$),低温时材料的导热系数值又较小,导热性能较弱,热传导更趋于稳态,温度场分布曲线的曲率较小,如图5中OD曲线。

6 结 语

(1)应用研究团队自主研发的“双试件平板式”热传导试验装置,实现了水稳基层和沥青面层的热传导试验研究,为大体积堆积材料的导热系数测定提供了重要技术参考。

(2)半刚性基层沥青路面材料的导热系数是一

个温变值,随着温度的升高大致呈线性增长态势;不同类型的沥青面层材料基本上具有相同的增长速率,水稳基层材料亦然;沥青面层材料的导热系数值略大于水稳基层材料。

(3)沥青路面材料导热系数的分析取值,首先应该区别2种级配类型——密级配和开级配,密级配混合料的导热系数值明显大于开级配类型;然后才是同类型级配的粒径问题,粗粒式混合料的导热系数值大于细粒式。

(4)影响沥青路面材料导热系数的关键因素,内因首要是空隙率,其次是粒径,而唯一的外因是温度;常用水泥剂量和沥青用量的影响则很小。

(5)现行水稳基层的导热系数取值比较稳定,大致在 $1.03\sim 1.60\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 之间;而沥青面层由于结构类型变化较大,导热系数的取值存在较大范围,取值在 $0.70\sim 2.10\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 之间。

(6)沥青路面的热传导通常是瞬态而非稳态。高温和低温时,路面温度场在理论上具有相同的分布规律,只是数值大小有别,分布曲向相反且对称,但高温时瞬态强烈,低温时更趋稳态。

(7)后续研究需要数值分析沥青路面的温度场与热传导的关系,建立基于热传导原理的温度场数值模型,深化认识沥青路面的热力学特性。

参考文献:

References:

- [1] 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 analyse on thermal field of asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [2] 李 瑾, 郭小宏, 胡兵华. 沥青路面就地热再生料垄温度场模型解算及意义[J]. 筑路机械与施工机械化, 2015, 32(10): 63-66.
LI Jin, GUO Xiao-hong, HU Bing-hua. Resolving of heat transfer model for temperature field of hot-in-place recycling material stack of asphalt pavement [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2015, 32(10): 63-66. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] 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.
- [5] 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)
- [6] 《中国公路学报》编辑部. 中国道路工程学术研究综述·2013[J]. 中国公路学报, 2013, 26(3): 1-36.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's road engineering research; 2013 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(3): 1-36. (in Chinese)
- [7] 延西利, 张世平, 白伟, 等. 沥青路面温度场的热量分析研究[J]. 公路交通科技, 2014, 31(8): 7-12.
YAN Xi-li, ZHANG Shi-ping, BAI Wei, et al. Analysis on heat of temperature field of asphalt pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(8): 7-12. (in Chinese)
- [8] 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 on the characteristic of heat transfer for asphalt pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 延西利, 李绪梅, 孙毅, 等. 基于傅立叶导热定律的沥青混合料热传导试验[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(6): 1-6.
YAN Xi-li, LI Xu-mei, SUN Yi, et al. Heat conduction experiment of asphalt mixture based on Fourier's heat conduction law[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(6): 1-6. (in Chinese)
- [11] 延西利, 张世平, 郑涛, 等. 一种沥青混合料热传导试验装置: 中国, 201410092385. 9[P]. 2014-06-25
YAN Xi-li, ZHANG Shi-ping, ZHENG Tao, et al. Heat conduction testing apparatus for bituminous mixture; China, 201410092385. 9[P]. 2014-06-25. (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 E1530—06, Standard test method for evaluating the resistance to thermal transmission of materials by the guarded heat flow meter technique[S].
- [15] 杨世铭. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
YANG Shi-ming. Heat transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998. (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.
WU Jian-liang, SUN Li-jun. Fourier series of non-periodic 1-D temperature field of pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(1): 29-34. (in Chinese)
- [17] JTG D50—2006, 公路沥青路面设计规范[S].
JTG D50—2006, Specifications for design of highway asphalt pavement[S]. (in Chinese)
- [18] JTG E20—2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
JTG E20—2011, Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering [S]. (in Chinese)
- [19] 张祎茹. 水泥稳定基层材料的热传导试验特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
ZHANG Yi-ru. Experimental characteristic of heat conduction of aggregates treated by cement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. (in Chinese)
- [20] 王利娟. 常用沥青面层材料的热传导实验特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
WANG Li-juan. Experimental characteristics of heat conduction of asphalt layers mixtures [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. (in Chinese)