

文章编号 :1002-0268(2006)08-0018-04

## 沥青路面温度场的分布规律

秦 健<sup>1</sup>, 孙立军<sup>2</sup>

(1. 上海市市政工程设计研究总院, 上海 200092; 2. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 路面结构持续经受着各种环境因素的综合作用, 这种作用的结果集中体现为路面温度场的复杂分布。深入地研究了环境因素对路面温度场的影响机制和路面温度场的分布规律后发现, 气温和太阳辐射强度是影响沥青路面温度场的主要因素, 二者对沥青路面温度场的影响具有累积性和滞后性的特点。通过对我国多个地区路面温度实测数据和气象资料进行回归分析, 建立了以气温、太阳辐射强度和路面深度为主要输入参数的沥青路面温度场预估模型。

**关键词:** 沥青路面; 温度场; 分布规律; 预估模型

中图分类号: U416.217

文献标识码: A

## Study on Asphalt Pavement Temperature Field Distribution Pattern

QIN Jian<sup>1</sup>, SUN Li-jun<sup>2</sup>

(1. Shanghai Municipal Engineering Design General Institute, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Thermal environmental conditions, to which asphalt pavements are continuously exposed, determine the complicated distribution pattern of pavement temperature field. The influence mechanism of environmental conditions on temperature field in asphalt pavement and the distribution pattern of pavement temperature field are analyzed. It is suggested that air temperature and solar radiation are principal factors affecting the pavement temperature, which are characteristics of hysteresis and accumulation. Through regression analysis between the measured pavement temperature data and meteorological data in several regions, a model to predict pavement temperature field is developed. The main inputs of the prediction model are air temperature, solar radiation intensity and depth.

**Key words:** asphalt pavement; temperature field; distribution pattern; prediction model

路面结构持续经受着各种环境因素的综合作用, 这种作用的结果集中体现为路面温度场的复杂分布。沥青材料是一种典型的温度敏感性材料。温度对沥青路面的承载能力和使用性能都有显著影响。沥青路面的各种常见损坏, 也直接或间接的与路面温度的分布状况有关。因此, 准确预测沥青路面温度场的分布特性和变化规律, 具有重要的理论和现实意义。

### 1 国内外研究现状

国内外对于沥青路面温度场的分布规律进行

了大量的研究。1957 年, Barber<sup>[1]</sup>首先使用半无限体半表面介质温度周期变化时的热传导方程的解来确定路面最高温度。上世纪 90 年代, 以确定沥青路面在其使用年限内可能经受的极端温度条件为目的, 美国和加拿大的 SHRP<sup>[2,3]</sup>、C-SHRP<sup>[4]</sup>、LTPP<sup>[5]</sup>等研究计划相继提出了路面最高和最低温度的预估模型。我国的严作人<sup>[6]</sup>于上世纪 80 年代建立了周期热力作用下层状路面温度场的预估方法。吴赣昌<sup>[7,8]</sup>则于上世纪 90 年代采用解析理论建立了半刚性基层沥青路面二维非线性不稳定温度场的计算理论。

收稿日期: 2005-05-10

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目 (50325825)

作者简介: 秦健 (1979-), 男, 河北张家口人, 硕士, 研究方向为路面结构和材料. (qj\_1979@yahoo.com.cn)

综合各国学者的研究方法,大致分为两类。一是理论分析法,即根据气象学和传热学的基本原理建立路面温度场的预估模型,如 Barber、严作人和吴赣昌的研究方法。二是统计分析法,即采用回归分析方法建立路面温度场与环境因素之间的关系,SHRP、C-SHRP、LTPP 的研究方法都属于这类。理论分析法建立的预估模型形式复杂,求解过程繁琐,输入参数多且难于准确获得,因此,其预测精度和在实际应用中的推广都受到限制。统计分析法建立的预估模型的形式和求解过程都比较简单,输入参数少,精度可以满足工程需要,在实际中的应用日益广泛。但是以往国内外采用统计分析方法建立的预估模型,多为沥青路面特征温度与某些环境因素之间的关系,很少涉及整个路面温度场与环境因素的普遍关系。

针对上述研究现状,本文在深入分析环境因素对路面温度的影响机制和路面温度场的分布规律的基础上,通过对我国多个地区 20 000 多组路面温度实测数据和气象资料进行回归分析,建立了沥青路面温度场的预估模型。

## 2 环境因素对路面温度场的影响

### 2.1 影响机理

环境因素对路面温度场的影响过程如图 1 所示。太阳直接辐射和散射辐射的总和称为太阳总辐射,这是一种短波的热辐射。太阳总辐射到达路表时,大部分被路面结构吸收并转变为热量;其余部分则通过路表的反射或散射返回大气中。云层状况、路面的表面特征、降雨、降雪等因素都会对太阳总辐射被路面结构吸收和反射的比例产生影响。

在路面结构与大气接触的介质表面上,路表温度和气温的差异会导致由于传导和对流引起的热交换。这种热交换主要取决于风速和路表温度与气温之差。

地面辐射与大气逆辐射之差称为地面有效辐射,这是一种长波的热辐射。地面有效辐射主要取决于路表和大气温度状况,也与大气的相对湿度和云

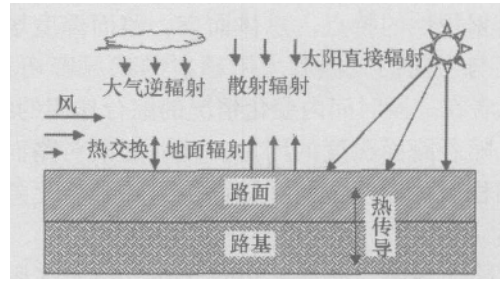


图 1 环境因素对沥青路面温度场的影响

Fig.1 The influence of environmental factors on temperature field in asphalt pavement

层状况有关。

路表和大气之间的热量交换,使路表产生复杂的温度变化,从而造成路表与路面其他部分的温度差异。路面结构中的这种温度差异促使热量沿深度方向向温度较低处传导。

### 2.2 主要影响因素

分析表明,在众多环境因素中,气温对沥青路面温度场的影响最为显著。太阳辐射仅出现在白天,是促使路面温度在白天升高的重要因素,也是除气温之外最主要的影响因素。

相对气温和太阳辐射而言,云层状况、大气的相对湿度、风速、降水等其他环境因素对于路面温度场的影响十分有限,且与气温和太阳辐射之间具有一定的相关性。因此,这些因素的影响可以通过气温和太阳辐射部分的体现出来。

### 2.3 主要影响因素和路面温度场的日变化规律

气温、太阳辐射强度和路面温度场的典型日变化过程如图 2 所示。一般而言,路面温度表现出与气温和太阳辐射强度接近的变化规律。气温和太阳辐射的变化对于路表和路面结构上层的温度可以产生即时的影响。在接近表面处,路面的温度变化与气温几乎同步。但是热量沿路面深度方向的传导需要一定的时间,环境因素的影响并不能马上反映在路面结构的下层。因此,随着深度的增加,路面温度的变化较气温和太阳辐射强度而言越来越滞后。可见,环境因素对于路面结构下层温度的影响具有滞后性的特点,而对于路面结构上层温度的影响则

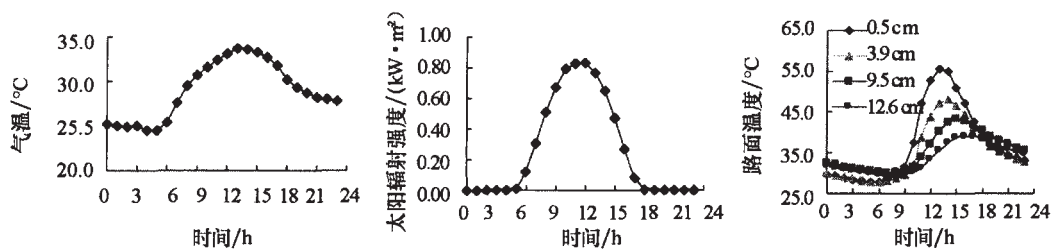


图 2 气温、太阳辐射强度和沥青路面温度场的日变化过程

Fig.2 Daily varieties of air temperature, solar radiation and temperature field in asphalt pavement

表现出累积性的特点。总体而言，路面温度场的分布不仅与当前的气温和太阳辐射的状况密切相关，也是二者在一段时间内变化情况的综合作用的结果。另外，随着路面深度的增加，环境因素对路面温度的影响程度也逐渐减弱，路面温度的日变化差异越来越小。

对路面温度与此前  $n$  小时平均气温和太阳辐射强度进行了相关分析，结果分别如表 1 和表 2 所示。分析表明，路面温度与此前  $n$  小时平均气温和太阳辐射强度的相关系数，表现出先增大后减小的特征，当  $n=5\sim6$  h 时达到最大值。这说明沥青路面温度场对 5 h 左右时间段内的气温和太阳辐射强度的变化情况最为敏感。

表 1 路面温度  $T_p$  与  $n$  小时平均气温  $T_{an}$  的相关分析结果  
Tab.1 Correlation analysis results for pavement temperature and average air temperature in  $n$  hours

	$T_{a1}$	$T_{a2}$	$T_{a3}$	$T_{a4}$	$T_{a5}$	$T_{a6}$	$T_{a7}$	$T_{a8}$
$T_p$	0.937	0.941	0.945	0.948	0.950	0.950	0.950	0.948

表 2 路面温度  $T_p$  与  $n$  小时平均太阳辐射强度  $Q_n$  的相关分析结果  
Tab.2 Correlation analysis results for pavement temperature and average solar radiation in  $n$  hours

	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$	$Q_7$	$Q_8$
$T_p$	0.212	0.249	0.283	0.314	0.341	0.343	0.336	0.330

路面温度场沿深度的分布十分复杂。路面温度场的典型分布如图 3 所示，图 3 中散点表示不同时刻路面温度沿深度的分布，而实线则分别是一次、二次和三次多项式的拟合结果。显然，路面温度在沿深度方向呈三次曲线分布。

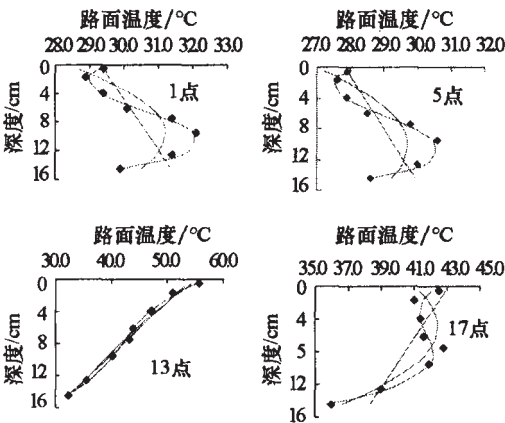


图 3 沥青路面温度沿深度的典型分布状况  
Fig.3 Typical distribution of asphalt pavement temperature along depth

### 3 沥青路面温度场预估模型的建立

#### 3.1 预估模型形式的选择

建立路面温度场预估模型的目的是预测路面温度随时间的变化和沿深度方向的一维分布。在综合考虑气温和太阳辐射的情况下，路面温度 ( $T_p$ ) 可以表示为气温 ( $T_a$ )、太阳辐射强度 ( $Q$ ) 和路面深度 ( $H$ ) 的函数  $T_p=f(T_a, Q, H)$ 。

路面温度与气温的  $m$  次方 ( $T_a^m$ ) 和太阳辐射强度的  $m$  次方 ( $Q^m$ ) 之间的相关分析结果分别如表 3 和表 4 所示。分析表明，路面温度和气温之间呈线性关系，与太阳辐射强度的平方的相关性最强。

表 3 路面温度与气温的  $m$  次方的相关分析结果  
Tab.3 Correlation analysis results for pavement temperature and the  $m$ th power of air temperature

	$T_a$	$T_a^2$	$T_a^3$
$T_p$	0.948	0.900	0.781

表 4 路面温度与太阳辐射强度的  $m$  次方的相关分析结果  
Tab.4 Correlation analysis results for pavement temperature and the  $m$ th power of solar radiation

	$Q$	$Q^2$	$Q^3$
$T_p$	0.236	0.243	0.241

基于上述环境因素对路面温度场的影响机理的分析，在预估模型中引入此前 5 h 平均气温 ( $T_{a5}$ ) 和 5 h 平均太阳辐射强度的平方 ( $Q_5^2$ )，反映环境因素对于路面温度场影响的滞后性和累积性的特点；引入气温和太阳辐射强度与路面深度的乘积 ( $H \times T_a$ ,  $H \times Q$ )，以反映环境因素对于路面不同深度处温度的不同影响程度；并通过路面深度 ( $H$ ) 的三次多项式可以更为准确地模拟路面温度沿深度方向的分布状况。综上所述，路面温度场预估模型可表示为：

$$T_p = p_1 + (p_2 T_{a5} + p_3 Q_5^2) + H(p_4 T_a + p_5 Q) + (p_6 H + p_7 H^2 + p_8 H^3)$$
  
式中， $T_p$  为沥青路面某一深度处的温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $T_a$  为当前气温， $^{\circ}\text{C}$ ； $Q$  为当前太阳辐射强度， $\text{kW}/\text{m}^2$ ； $T_{a5}$  为此前 5 h 平均气温， $^{\circ}\text{C}$ ； $Q_5$  为此前 5 h 平均太阳辐射强度， $\text{kW}/\text{m}^2$ ； $H$  为路面深度， $\text{cm}$ ； $p_1 \sim p_8$  为待定的回归系数。

#### 3.2 预估模型系数的确定

对路面温度实测数据和气象资料进行回归分析，即可得到路面温度场预估模型式待定回归系数。回归分析的结果如表 5 所示。预估模型的复相关系数  $R$ 、判定系数  $R^2$ 、经过调整的判定系数  $R_{adj}^2$  以及标准

误差相对回归分析中的数据量都达到相当高的水平。

表 5 预估模型的回归分析结果

Tab.5 Regression analysis results for the prediction model

自变量	加归系数名	加归系数值
常数	$P_1$	-0.248
$T_{a6}$	$P_2$	1.209
$Q_5^2$	$P_3$	23.823
$H \times T_a$	$P_4$	-0.003
$H \times Q$	$P_5$	-0.743
$H$	$P_6$	0.068
$H^2$	$P_7$	-0.016
$H^3$	$P_8$	0.001
$R$		0.981
$R^2$		0.963
$R_{adj}^2$		0.963
标准误差		3.610
数据量		23 292

3.3 预估模型预测效果的评价

为了验证沥青路面温度场预估模型的预测效果，对路面温度实测值和由预估模型计算得到的预测值进行了对比分析，如图 4 所示。分析显示，数据点基本上均匀且集中的分布在 45 等值线的两侧，实测值和预测值之间具有较高的一致性。预估模型具有较高的预测精度，能够准确模拟路面温度随时间的变化和沿深度方向的一维分布。

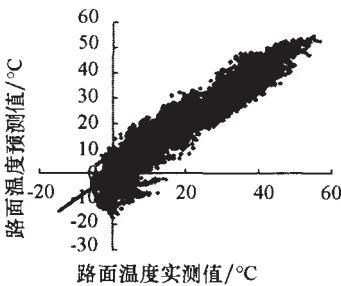


图 4 路面温度实测值和预测值的对比

Fig.4 Comparison of measured value and predicted value pavement temperature

4 结论

本文分析了环境因素对路面温度场的影响机制和路面温度场的分布规律。研究表明，气温和太阳辐射是影响路面温度的主要环境因素，二者与路面温度的影响具有滞后性和累积性的特点。在沿路面深度方向，路面温度呈三次曲线分布。通过回归分析方法，建立了以气温、太阳辐射强度和路面深度为主要输入参数的沥青路面温度场预估模型。分析表明，该预估模型形式简单，计算方便，具有较高的预测精度，且可较为准确地模拟路面温度随时间的变化和沿深度方向的一维分布。

参考文献：

[1] BARBER E S. Calculation of Maximum Pavement Temperatures from Weather Reports [A]. Washington D C: Highway Research Board, Bulletin 168, National Research Council, 1957.

[2] HUBER G A. Weather Database for the SUPERPAVE Mix Design System [R]. Washington D C: Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1994.

[3] KENNEDY T W, et al. Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program [R]. Washington D C: Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1994.

[4] ROBERTSON W D. Determining the Winter Design Temperature for Asphalt Pavement [A]. Proceeding of Association of Asphalt Paving Technology, 1997.

[5] MOHSENI A, M SYMONS. Improved AC Pavement Temperature Models from LTPP Seasonal Data [A]. Washington D C: Transportation Research Board 77<sup>th</sup> Annual Meeting, 1998.

[6] 严作人. 层状路面温度场分析 [D]. 上海: 同济大学, 1982.

[7] 吴赣昌. 半刚性路面温度应力分析 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.

[8] 吴赣昌, 黄国顺. 自然条件下沥青路面结构的温度分布[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 1998, (1).