

# 沥青路面铺筑温度场数值仿真模型

王黎明<sup>1,2</sup>, 谭忆秋<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150086; 2. 东北林业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150040)

**摘要:** 为确定一定环境下沥青混合料铺筑过程温度衰减规律, 对铺筑过程路面温度场的仿真模型进行了研究. 采用非连续的随碾压次数而变的层厚、材料热物性和洒水散热条件, 连续的随温度而变的对流换热、辐射换热条件, 以及非均匀的底层初始温度场, 建立了一维仿真模型. 通过变换几何模型及循环调用初始温度场的方法, 实现了非连续条件在连续场分析中的应用. 由仿真模型验证, 本文模型可以在不同环境条件下实现铺筑过程温度场仿真.

**关键词:** 道路工程; 数值仿真模型; 铺筑温度场; 沥青路面

中图分类号: U 416. 217

文献标志码: A

文章编号: 0254 - 0037(2013) 12 - 1827 - 08

## Research on Simulation Model of Asphalt Pavement Paving Temperature Field

WANG Li-ming<sup>1,2</sup>, TAN Yi-qiu<sup>1</sup>

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150086, China;

2. College of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** In order to determine the cooling law of asphalt mixture paving in a certain circumstances, the authors had studied the temperature field simulation model of paving process. The one-dimensional simulation model had been set up under some particular conditions: layer thickness, thermophysical parameters and sprinkler cooling which were discontinuously changing with rolling times; convective and radiation heat transfer which were continuously changing with the surface temperature; and the uneven initial underlying temperature fields. By transforming geometric model and cycle calling the initial temperature fields, discontinuous conditions had been used in the continuous field analysis. Validation tests have shown that the model could achieve simulation of paving cooling in different environments.

**Key words:** road engineering; numerical simulation model; paving temperature field; asphalt pavement

### 0 引言

由于沥青混合料的施工特性依赖温度, 道路工作者需要了解在特定环境下混合料冷却到允许施工温度下限所需要的时间, 或者反之, 当必须控制压实时间时, 需要知道环境的限制条件. 这 2 种问题的定量解答要基于热态沥青混合料铺筑过程热扩散的

方式、温度场的变化特征、以及影响因素分析. 但是, 铺筑温度场受到环境、结构、材料性质等多因素的影响, 基于工程观测难以得到全面、准确的温度场变化规律, 开展基于数值模型的仿真研究是解决该问题的理想办法.

迄今为止, 英国和美国的学者对沥青路面铺筑温度场做过比较系统的研究. 20 世纪 70 年代, 英国

收稿日期: 2012-09-25.

基金项目: 国家“十一五”科技支撑项目资助(2008BAG10B02); 黑龙江省自然科学基金项目资助(E201136).

作者简介: 王黎明(1975—), 男, 博士研究生, 副教授. 主要从事路面材料与结构等方面的研究, E-mail: wlmdux@126.com.

TRRL( the Transport and Road Research Laboratory) 提出了有关铺筑过程温度场的研究报告<sup>[1]</sup>. 1998年美国明尼苏达交通运输部“PaveCool”项目<sup>[2]</sup>基于热扩散模型分析了路面铺筑压实过程的降温规律. 在我国,自20世纪90年代以来,众多学者开展了基于观测和统计的铺筑温度场特征和影响因素研究,孙洁<sup>[3]</sup>和张志峰<sup>[4]</sup>等基于数值仿真方法对其进行过相关分析. 在国内外现有研究中,文献[1]和[4]的仿真模型中所有边界和荷载条件均为固定条件;文献[3]模型没有考虑铺层层厚与密度等材料热物性随碾压的变化,也没有考虑不同路面结构的影响;文献[2]的仿真模型未考虑底层温度场的非均匀性和对流换热随温度变化的特性. 由文献[2]的研究成果看,铺筑温度场对厚度、材料热物性和底层温度都很敏感. 显然,上述模型都存在一定缺陷. 针对上述问题,作者根据传热学理论和试验对铺筑过程温度场的仿真模型进行了研究.

## 1 仿真模型和条件假设

### 1.1 基本假设

沥青混合料以相对薄层方式铺筑,层内初始温度和厚度近似一致,沥青铺层在长宽方向远大于厚度方向. 观测证明,底层20 cm以下深度处的温度在铺筑时间段内无显著变化. 由此,采用如图1的分析模型.

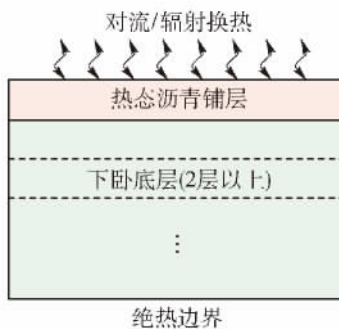


图1 铺筑温度场仿真模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of paving temperature field simulation model

传导、对流和辐射是传热的3种基本方式. 为简化分析,认为上边界只发生对流和辐射,而沥青铺层和底层只发生1维热传导. 由温度场观测和前人研究建立4条基本假设:

- 1) 各层材料的热物性均质且各向同性;
- 2) 底层为2层以上不同材料构成,总厚度50

cm;

- 3) 各层层间接触良好,不存在热阻,连续传热;
- 4) 模型两侧和最底层绝热.

### 1.2 压实过程中的层厚变化条件

根据Dellert<sup>[5]</sup>等人的观测,在常规的碾压工艺下,不论何种设备组合,厚度4~8 cm沥青路面经历1遍碾压后层厚将压缩总变形的60%~70%,2遍碾压后达到总变形的80%~90%,剩余的压实使其达到100%. 由此假定经历3遍碾压后路面达到压实度标准,设摊铺机后松铺系数为1.25,从而摊铺后层厚为设计的1.25倍,1遍碾压后为1.1倍,2遍碾压后为1.05倍,3次碾压后达到设计值.

### 1.3 压实过程中的铺层材料热物性条件

材料密度、比热容和导热系数是影响热传导的3个基本要素,在铺筑过程中,随着温度的连续变化和密实度的不连续变化,铺层材料比热容和导热系数也将发生变化.

#### 1.3.1 铺层材料密度

铺层材料的密度随压实厚度而变,根据1.2节中铺层厚度的变化规律假设,若3遍碾压后达到压实度标准,则摊铺后以及碾压1、2、3遍后的密度分别为标准密度的0.8、0.91、0.95和1倍. 标准密度取最大理论密度的92%.

#### 1.3.2 铺层材料比热容

近50年来,不同研究者所测沥青混合料常温比热容在800~1300 J/(kg·°C)<sup>[6]</sup>. 测试数据差异显著的原因在于混合料比热容同时受到材料组成、温度和测试方法的影响. 由于比热代表某温度下单位质量物质蓄热的能力,与混合料空隙无关(空气比热极小). 混合料中沥青比例相对很低,且不同沥青的比热差异不大,因此混合料比热随温度变化规律取决于集料. 文献[6]采用差热量热仪实测组成材料在不同温度段比热后采用加和原理推算出不同集料混合料在不同温度的比热. 鉴于混合料性质的差异,根据文献[6]数据回归得到不同集料混合料比热随温度变化率,取前人实测常温比热平均值为初值,建立铺层材料随温度变化的比热容一般性方程

$$c_{m,t} = K\theta + 1000 \quad (1)$$

式中: $c_{m,t}$ 为某温度状态下的混合料比热容(J/(kg·°C)); $\theta$ 为温度,20~180°C; $K$ 为取决于集料类型的系数,花岗岩1.5812,玄武岩2.1496,石灰岩3.0323.

#### 1.3.3 铺层材料导热系数

在复合材料内,热流要选择热阻最小的通道传递,因而包含气孔的复合材料导热系数不仅与组成

材料的导热系数相关,还与组成材料各相的相对含量、分布状态和排列取向相关。上述原因使得不同研究所测混合料导热系数随温度变化规律不同,有些甚至相反。文献[6]采用非稳态导热冷却法测定不同密实度混合料在 70~160℃的导热系数,结果显示最密实(空隙率  $\beta = 5.8\%$ )混合料的导热系数随温度缓慢递增;最松散( $\beta = 18.3\%$ )的随温度缓慢递减;中等密实( $\beta = 7.2\%$ 和 $\beta = 11.8\%$ )的随温度递减,且其值介于最密实与最松散之间。在铺筑过程中,混合料空隙率大部分时间都处于 6%~10%,而 8%为规范规定的压实度标准(相对最大理论密度为 92%)所对应空隙率。将文献[6]测定值按多孔材料导热系数随温度变化的基本模型进行回归,取得 $\beta = 8\%$ 时混合料随温度而变的导热系数方程为:

细粒和中粒式 AC

$$\lambda_1 = 1.9 - 0.012(\theta - 70) \quad (2)$$

粗粒式 AC 和 SMA

$$\lambda_1 = 1.36 - 0.008(\theta - 70) \quad (3)$$

式中: $\lambda_1$ 为混合料随温度改变的导热系数( $W/(m \cdot ^\circ C)$ ); $\theta$ 为混合料温度,70~180℃;

将混合料中的集料和胶浆的混合物视为一相,空气视为另一相,引用 Williamson<sup>[7]</sup>的沥青混合料导热系数几何平均模型

$$\lambda_1 = \lambda_{f(\theta)}^{1-\beta} \lambda_{a(\theta)}^\beta \quad (4)$$

式中: $\lambda_{f(\theta)}$ 为集料与胶浆的导热系数; $\lambda_{a(\theta)}$ 为空气的导热系数; $\beta$ 表示空隙率。

将式(2)(3)和干空气导热系数带入式(4),反推集料和胶浆的导热系数后,得到混合料随温度和空隙率同时改变的导热系数一般性方程为:

细粒和中粒式 AC

$$\lambda_1 = (4.0 - 0.018\theta)^{1-\beta} (0.03 + 0.000074\theta)^\beta \quad (5)$$

粗粒式 AC 和 SMA

$$\lambda_1 = (2.7 - 0.012\theta)^{1-\beta} (0.03 + 0.000074\theta)^\beta \quad (6)$$

由式(5)(6)可以计算混合料在不同碾压阶段随温度而变的导热系数。

#### 1.4 底层材料热物性参数取值

底层材料密度在碾压过程中近似不变。由工程观测,底层 1 cm 深度处温度在 40 min 内只提高 30~40℃,而底层 5~8 cm 以下深度的温度基本保持不变。因此仿真分析中底层材料导热系数和比热取定值,参数如表 1 所示。

表 1 底层材料热物性参数

Table 1 Thermophysical parameters of underlying materials

材料类型	热物性参数		
	$\rho/$ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	$c$ J/( $kg \cdot ^\circ C$ )	$\lambda$ W/( $m \cdot ^\circ C$ )
沥青混合料	2 400	1 000	1.50
无机结合料稳定粒料	2 200	900	1.40
无粘结粒料	1 800	860	1.00
水泥混凝土/贫混凝土	2 500	1 200	1.60
路基细粒土	1 700	860	1.20

#### 1.5 表面对流条件

由于对流传质传热的复杂性,工程中对流换热系数的经验公式比理论公式精确度更高。既有路面温度场研究中对流换热通常只考虑空气流速的影响,但热态沥青混合料与环境有较大的温差,在一定条件下混合对流明显,不考虑温差影响将增大仿真误差。为此,采用 Solaimanian<sup>[8]</sup>的经验公式

$$h_c = 698.24 \left[ 0.00144 \left( 273.15 + \frac{\theta_s + \theta_a}{2} \right)^{0.3} v^{0.7} + 0.00097(\theta_s - \theta_a)^{0.3} \right] \quad (7)$$

式中: $h_c$ 为对流换热系数( $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ); $\theta_s$ 、 $\theta_a$ 为铺层表面温度与空气温度(℃); $v$ 为风速。

式(7)考虑了边界层膜温度变化对受迫对流的影响,与风速相关的计算项用路面与空气平均温度修正。高风速(1~8 m/s)时,式(7)的推算结果与全美采暖、制冷及空调工程师协会(ASHRAE)的推算结果接近。低风速时( $<0.5$  m/s),传热学中的理论解相对精确。取铺筑过程路面温度 70~160℃,空气温度 20℃,空气热膨胀系数按定压条件下理想气体状态方程计算,得到格拉晓夫数  $Gr = (1.03 \sim 2.27) \times 10^8$ ,而瑞利数  $R_a = (7.2 \sim 15.9) \times 10^7$ ,因此判断此时自然对流状态为介于层流和湍流之间的过渡流。式(7)的低风速推算结果介于经典传热学中恒壁温水平大平壁的层流和湍流理论关联解之间,符合预期。因此,式(7)可作为高、低风速下的统一对流换热模型。

#### 1.6 太阳辐射条件

##### 1.6.1 晴天水平面太阳总辐射

进入路面的太阳总辐射包含太阳直射辐射和散射辐射,地球表面某一局地的太阳直射辐射强度受太阳高度角、大气透明系数、海拔高度、纬度和地形

的影响,而散射辐射和直射辐射在常条件下关联.由于分析时间相对短暂,在一定铺筑时间段内的太阳总辐射强度可以视为不变,水平面上的太阳总辐射强度的理论计算公式为

$$\left. \begin{aligned} q_{\text{tH}} &= q_{\text{DN}} \sin H_A + q_{\text{dH}} \\ q_{\text{DN}} &= A / \exp(B / \sin H_A) \\ q_{\text{dH}} &= C q_{\text{DN}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中:  $q_{\text{tH}}$  为水平面上的太阳总辐射强度 ( $\text{W}/\text{m}^2$ );  $q_{\text{DN}}$  为垂直于太阳辐射方向直射辐射强度 ( $\text{W}/\text{m}^2$ );  $q_{\text{dH}}$  为水平面上的散射辐射强度 ( $\text{W}/\text{m}^2$ );  $A$  为零大气质量下的表观太阳辐射强度 ( $\text{W}/\text{m}^2$ );  $B$  为大气的消光系数;  $C$  为大气的散射因子;  $H_A$  为与地理纬度、太阳赤纬和时角相关的太阳高度角.

式(8)为太阳辐射强度的通用计算式,其中的  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三项由于受到地带性气候差异的影响,不同的地区应采用不同的回归参数.本文引用表2中ASHRAE的晴天太阳辐射模型系数推算不同月份晴天太阳总辐射强度.

表2 ASHRAE晴天辐射模型系数

Table 2 Sunny radiation model coefficient of ASHRAE

月份	$A$ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	$B$	$C$
1	1 230.23	0.142	0.058
2	1 214.46	0.144	0.060
3	1 186.07	0.156	0.071
4	1 135.60	0.180	0.097
5	1 104.06	0.196	0.121
6	1 088.29	0.205	0.134
7	1 085.13	0.207	0.136
8	1 107.21	0.201	0.122
9	1 151.37	0.177	0.092
10	1 192.38	0.160	0.073
11	1 220.77	0.149	0.063
12	1 233.39	0.142	0.057

美国地理纬度与我国相似,在宏观上采用ASHRAE太阳辐射模型的误差可以为我国工程研究接受.本文的多次观测证明完全晴天状态下ASHRAE模型与实测值相差不超过10%.

### 1.6.2 太阳辐射吸收率

太阳辐射吸收率与地面状况、颜色、粗糙度和太阳高度角等因素有关,通常颜色深、粗糙度大、太阳高度角高时吸收率大.目前国内缺乏相关研究的观测资料,在服役期路面温度场分析中通常采用

0.80~0.95的定值<sup>[9]</sup>.作者认为铺筑过程中沥青路面清洁且粗糙度较高,同时吸收率可能受到太阳入射角的影响.由此采用手持式太阳辐射强度仪正置测定实时太阳总辐射强度  $q_0$ ,由于该设备只接受0.2~3  $\mu\text{m}$ 的短波辐射,将其倒置平行于路面则可测得路面反射短波辐射强度  $q_r$ ,太阳辐射吸收率  $\alpha$ 值见表3,  $\alpha$ 的计算公式为

$$\alpha = (q_0 - q_r) / q_0 \quad (9)$$

表3 新铺沥青面层表面太阳辐射吸收率实测数据

Table 3 Solar radiation absorption rate measured data of just paved asphalt pavement

时刻	$q_0 /$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )	$q_r /$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )		$\alpha$	
		AC-16	AC-25	AC-16	AC-25
8:00	679	37	35	0.946	0.948
10:00	884	48	38	0.946	0.957
12:00	1 099	55	50	0.950	0.955
14:00	895	44	43	0.951	0.952
16:00	630	42	34	0.933	0.946
平均值				0.945	0.952

注:测试日期为2012-06-22,全天晴朗,时有高云.

由表中数据,太阳高度角最高的中午时刻吸收率相对早晚略高,但并不十分明显.AC-16吸收率0.945~0.951,AC-25吸收率0.946~0.957,二者的差异也并不明显.由此,本文分析中对于一日内无论何种时刻,取太阳辐射吸收率  $\alpha = 0.95$ 的定值.

### 1.6.3 太阳辐射修正

式(8)只能描述完全晴天状态的太阳辐射和总辐射日变化过程,而太阳辐射受到天气的影响很大,其中云量的多寡对其起决定作用.本文采用太阳辐射透过率法对直射辐射进行修正来计算任意天空状态下的总辐射强度.太阳辐射透过率与天空的总云量和低云量呈线性关系.研究依据文献[10]记载各月总辐射量和云量的关系,在不同云量水平下计算了某市1961—2000年1、4、7、10月份的太阳辐射透过率,分别代表春、夏、秋、冬四季.计算结果绘于图2.图中各不同季节代表月份的太阳辐射透过率基本遵循同一线性变化关系,其不同代表月份在同一云量水平下的数值也接近.这样的规律说明该太阳辐射透过率数据和数据关系也可以用于其他地区.该组数据的平均回归关系为

$$k = 100 - 8.1219n \quad (10)$$

式中:  $k$  表示太阳辐射透过率(%);  $n$  表示云量,按云遮蔽天空视野的成数划分为0~10级,其中云量

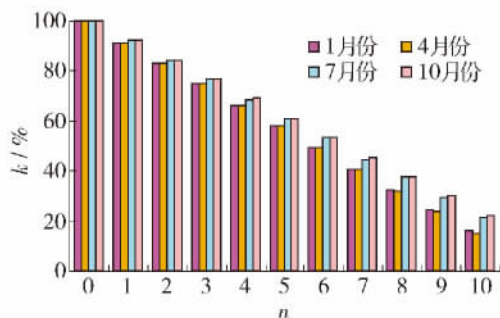


图 2 云量与太阳辐射透过率关系  
Fig.2 Relationship of cloud cover with solar radiation transmission rate

不到天空的 5% 时总云量记 0, 云占全天 10% 时总云量记 1, 其余依次类推. 由此, 将式 (8) (10) 联合使用, 则能预估任何阴晴状况下的太阳总辐射.

### 1.7 路面有效辐射条件

#### 1.7.1 辐射背景温度

路面有效辐射是指路面向外辐射与大气逆辐射的差额. 路面向外辐射与大气逆辐射二者都属于长波辐射. 在大尺度气象学中, 地面向外辐射换热的计算方法采用基于 Stefan-Boltzmann 定律推导的空间热阻网络模型公式

$$q_{re} = \varepsilon \sigma (T_e^4 - T_s^4) \quad (11)$$

式中:  $q_{re}$  表示地面有效辐射强度 ( $W/m^2$ );  $\varepsilon$  表示地面长波发射率;  $\sigma$  表示 Stefan-Boltzmann 常数;  $T_e$  表示地面温度 (K);  $T_s$  为有效天空温度 (K).

有效天空温度是表征天空逆辐射总量的温度参数. 作为地面辐射的对象温度, 与所在地区的季节、纬度、海拔、空气湿度和云量等因素有关, 当云层厚且低时, 天空逆辐射以云层为主,  $T_s$  接近气温; 天气干燥且无云时,  $T_s$  向臭氧层温度靠近. 有效天空

温度与地面气温 (尤其是夏季) 相差很大, 在很多服役期路面温度场研究中, 都使用式 (11) 分析有效辐射换热, 但其中辐射对象温度却采用地面气温, 这样计算的结果可能显著偏高.

$T_s$  受地面温度的显著影响, Bliss<sup>[11]</sup> 提出经验公式, 依据地面温度计算晴空有效天空温度.

$$T_s = 0.055 2 T_e^{1.5} \quad (12)$$

式中  $T_e$  为大地地面温度 (K). 由于大气温度相对地面温度波动的滞后性, 在气象学中  $T_e$  常取一定周期平均大地温度, 本文取铺层底面以下 20 cm 处的推算地温作为计算依据.

#### 1.7.2 有效辐射发射率

式 (11) 中地面对天空的发射率  $\varepsilon$  主要取决于地面覆盖物颜色和粗糙度, 服役期沥青路面在常温下的发射率约为 0.85 ~ 0.93<sup>[11]</sup>. 由于通车后沥青路面表面颜色变浅且粗糙度降低, 铺筑过程中沥青路面发射率应高于服役期. 本研究在采用红外热像仪进行路面铺筑温度场观测中反复利用温度计标定其设定不同发射率的测定值, 结果显示铺筑过程沥青路面的发射率为 0.91 ~ 0.95, 该范围比服役期沥青路面高约 4% ~ 5%. 材料的辐射率还与自身温度相关 (温度不同, 辐射波长不同), 但在沥青路面铺筑过程中的高温并不足以达到明显影响辐射波长的程度, 因此铺筑过程中的温度变化对自身辐射发射率几乎无影响. 由此, 仿真模型采用实测发射率中值  $\varepsilon = 0.93$ .

#### 1.7.3 有效辐射修正

天气因素, 尤其是云量和云状对地面有效辐射的影响极大, 由于云的存在, 加强了大气逆辐射, 使有效辐射急剧减小. 文献 [12] 中其他条件相同时不同云况下地面有效辐射数值见表 4.

表 4 不同云状下的有效辐射

Table 4 Effective radiation at different colud condition

云状	晴	卷云 (层状)	高积云 (积状或波状)	低云 (层状或积状)
$q_{re} / (W \cdot m^2)$	102.6	86.5	32.8	28.6

由此, 在小尺度气象学分析中, 必须同时考虑地面温度和云量云状对有效辐射的影响. 气象学中云量云状对有效地面辐射的影响计算公式为

$$q_{re, \rho} = (1 - C_n) q_{re, s} \quad (13)$$

式中:  $q_{re, \rho}$  为有云时有效辐射 ( $W/m^2$ );  $q_{re, s}$  为晴朗时有效辐射 ( $W/m^2$ );  $C_n$  为总云状系数,  $C_n = (C_h n_h + C_m n_m + C_l n_l) / n$ , 其中  $n_h$ 、 $n_m$ 、 $n_l$  分别代表高云、中云

和低云的云量, 3 种云量之和为总云量  $n$ ; 而  $C_h = 0.15 \sim 0.2$  为积状云的系数、 $C_m = 0.5 \sim 0.6$  为层状云的系数、 $C_l = 0.7 \sim 0.8$  为波状云的系数.

服役期温度场分析中常用经验公式直接计算有效辐射热流密度, 但铺筑过程路面温度场处于连续快速变化状态, 采用小尺度气象学中与天气状况相关的有效天空温度  $T_s$  进行数值分析更为方便. 基于

上述分析,采用式(11)(12)联立计算晴天路面有效辐射,采用式(13)修正云量、云状对实时有效辐射的影响。

### 1.8 表面洒水换热条件

根据红外热像仪表面铺筑温度变化观测,单次洒水碾压对表面温度场的影响只发生在碾压后约2 min之内,但是经历多次洒水碾压后累计的热扩散总量一定会影响温度场的最终分析结果。

碾压过程的洒水换热量 $\Phi$ 取决于洒水量、水的加热和汽化吸热

$$\Phi = c_w m (100 - \theta) + L_w m \quad (14)$$

式中: $c_w$ 为常温常压下水的比热容(J/(kg·°C)); $m$ 为洒水质量(kg); $\theta$ 为洒水温度(°C); $L_w$ 为常压下水的汽化相变潜热(J/kg)。

常温常压下,每千克水由20°C加热至100°C约需要吸热334 kJ,再变成饱和水蒸气约需要吸热2257 kJ。尽管在自然条件下汽化不可能变成饱和水蒸气,但相变过程需要吸收的能量比加热过程大1个数量级。因此洒水热流以相变换热为主,与洒水的温度关系不大,换热量主要与洒水量相关。压路机的洒水量应该根据是否粘轮动态调整,通常钢轮压路机在碾压过程中要始终保持碾轮润湿,轮胎压路机碾压的碾轮被路面加热以后粘轮不再明显,所需洒水量就不多了。但笔者访问的多数压路机手承认除非特殊要求或暂停,否则在碾压过程中不会调整洒水系统水量。常用12 t钢轮压路机的耗水量在100~500 kg/h的范围不等。

取压路机平均耗水量300 kg/h,碾压平均速度5 km/h,碾轮宽度2 m作为计算依据,得到单位面积单次碾压洒水量为30 g/m<sup>2</sup>。按式(14)单次碾压洒水汽化约需要吸热75 kJ。假定这些热量平均在碾压后1 min内耗散,则得到洒水散热热流密度为1250 W/m<sup>2</sup>。在仿真分析中将热量耗散施加于每次碾压后的1 min之内。

### 1.9 底层初始温度场条件

在路面结构的不同深度处,温度随日时间的波动受到环境和结构条件影响,路表的温度波动最大,越深处波动越小,路表和其下20 cm深度处的温差可能达到10°C以上。

底层表面温度是容易测得的,但内部的温度分布只能通过适当的模型进行预估。为分析沥青路面力学行为,有关既有路面温度场预估模型的研究非常广泛,其中以美国LTPP提出的BELLS系列模型最为典型,已经被广泛引用。本文采用Park<sup>[13]</sup>基于

BELLS模型的单正弦修正公式,由实时表面实测温度预估底层温度场

$$\theta_d = \theta_s + (-0.3451d - 0.0432d^2 + 0.00196d^3) \times \sin\left(-6.3252\frac{t}{24} + 5.0967\right) \quad (15)$$

式中: $\theta_d$ 为底层某深度处温度(°C); $\theta_s$ 为铺筑时底层表面温度(°C); $t$ 为时间参数(h),例如当为13:15时,该值为13.25; $d$ 为底层表面向下的深度(cm)。

Park模型在晴天和多云状态且厚度小于20 cm时的预估值较好,而阴雨天预估值较差<sup>[13]</sup>。由于沥青路面铺筑需回避阴雨,同时铺筑过程底层温度场变化观测表明,底层温度影响在深度大于5~8 cm后不敏感。虽然式(15)是基于沥青路面而建立的,但另有研究证明,在同一地点,不同路面结构的路表温度波动和相同深度处温度的波动基本上是相同的<sup>[14]</sup>。为此,本文采用式(15)预估底层20 cm深度内的温度场,而20 cm以下深度采用均匀温度,大小等同于20 cm处的预估值。

### 1.10 压实时间历程条件

由于施工工况的差异,施工中的时间历程有很大的差别,通常变化为20~40 min。单次碾压的时间间隔也有很大差别,在实际施工中,当摊铺连续进行之后,理论上初压压路机应立即给予压实。初压通常为1遍,偏硬的混合料也可给予2遍初压;复压紧跟初压进行,复压的遍数通常为4~6遍,复压往返段长度通常大于初压;终压通常为2遍,有时紧跟复压进行,有时于温度进一步下降后开始。总体上压路机在不同阶段的碾压时间间隔是先短后长,每次压实沥青混合料段的段长和时间并不是一定不变的,这取决于特定环境条件下的混合料的有效压实时间与混合料在某温度段的可压实性。

结合工程经验,在分析中假定工程连续进行,压路机紧跟摊铺机,初压在摊铺后马上开始,压实2遍,压实间隔2.5 min;复压加终压6遍,压实间隔4 min。

## 2 仿真试验工具和实现技术

研究将仿真分析问题分解为边界条件与荷载条件本构关系辨识、模型构建,模型在计算机中实现、模型检验、仿真结果输出5个过程。为减少仿真模型在计算机中实现的难度,本文采用通用CAE软件ANSYS的热分析模块,简化了系统模型转化为计算机模型的过程。

ANSYS 热分析模块基于有限元法进行分析,为达到分析精度,有限元模型网格在热流集中的上下边界部位应细化. 研究将铺层划分成上下密而中间疏的不等间距网格,与铺层相接触底层划分成上密下疏的网格,再向下为等间距网格.

由于在分析中包含非连续厚度变化条件,在连续的场分析中不能直接实现. 为此,采用了循环更新几何模型及各种参数的办法以实现各种条件随碾压次数的变化. 在每次的几何模型更新中,保持有限元模型节点编号不变,第 1 次碾压前的初始温度场预定义,以后每步引用前一步的分析结果作为初始条件.

为实现各种热荷载在铺筑温度场中的叠加,修正后太阳辐射和洒水换热换算成热流密度施加于实体单元;对流换热和有效辐射施加于表面效果单元,其中考虑云量、云状对有效辐射的修正计入发射率中,而气温和有效天空温度定义于空间节点.

ANSYS 热分析模块提供多种求解方式,在每次调用子程序使用上一步的温度场作为初始温度条件时,默认求解方式为自动调节积分分子步步长的正向直接求解法,这样可能造成初始分析结果的发散,每步初始温度分析结果发生微小跳跃. 为此在每个分析步中采用固定积分分子步步长的方式,并使用稀疏矩阵直接求解法以弱化这种误差. 由于很多条件都是高度非线性的,在求解时应打开线性搜索和反向欧拉时间积分. 限于篇幅,详细的仿真分析过程另文讨论.

### 3 仿真模型验证

作者通过不同条件下铺筑过程温度观测与仿真对模型进行了试验验证,试验条件见表 5 所示. 并选取 3 次典型结果绘制于图 3.

图 3 中铺层中温度为预埋温度传感器观测结果,铺层表面温度采用局部多点观测的平均值. 其中图 3(a)为包含底层结构的全厚度温度场观测,其余为铺层温度场观测. 由对比试验,基于本文模型的仿真变化趋势和结果与观测基本相符;层表的仿真结果相对实测有较大的跳跃,但总体趋势和最终结果仍然有很好的相符性. 研究所采集的另外 30 余次温度场观测数据也与采用本仿真模型的试验结果具有良好的一致性. 因此,可以认为本文仿真模型可以在不同环境条件下实现较精确的铺筑过程温度场仿真.

表 5 验证试验条件

Table 5 Conditions of experimental verification			
项目	条件 1	条件 2	条件 3
地点	五大连池	哈尔滨	哈尔滨
时间	2011-09-10	2012-05-23	2012-06-07
时刻	11:00—12:00	12:05—12:35	16:55—17:25
铺层结构	7 cmAC-20	5 cmAC-16	5 cmSMA-16
底层结构	①	②	③
$\theta_a / ^\circ\text{C}$	24	23	26
$\theta_s / ^\circ\text{C}$	28	37	33
$\bar{v} / (\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	4.5	5	3
$q_{\text{雨}} / (\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	695	780	180
$n$	0	0.5	5
云状		波状高云	层状中云

注: ①为 22 cm 旧水泥路面 + 20 cm 水泥稳定砂砾 + 细粒土路基; ②为 6 cmAC-16 + 20 cm 水泥稳定碎石 + 细粒土路基; ③为 6 cmAC-16 + 10 cm 旧沥青路面 + 20 cm 二灰碎石 + 细粒土路基.

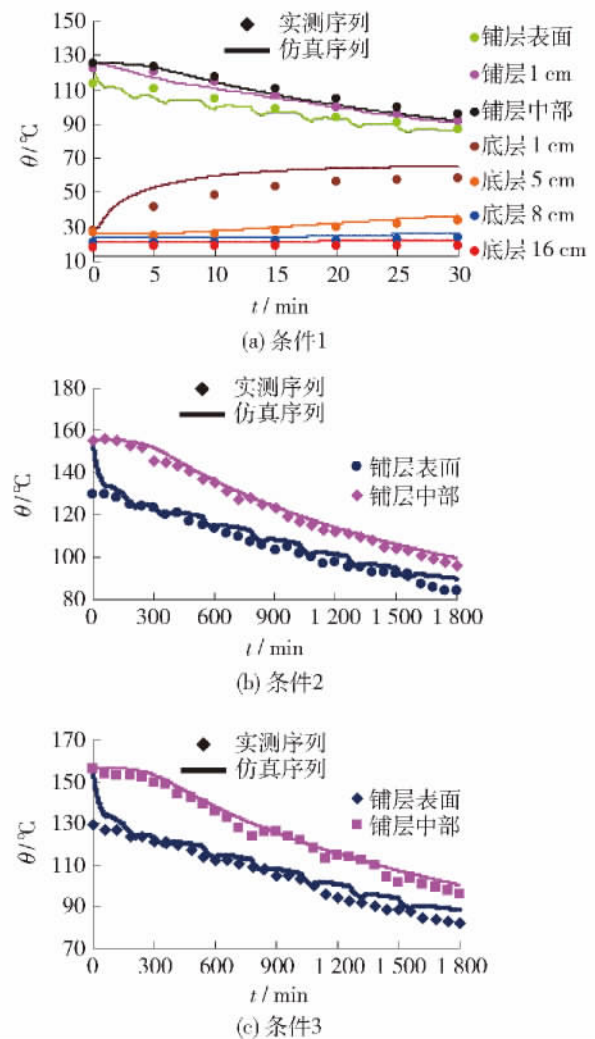


图 3 不同条件下的铺筑温度场观测与仿真试验结果  
Fig. 3 Surry and simulation results of paving temperature field in different environment

## 4 结论

1) 根据传热学理论和试验,建立了沥青路面铺筑温度场数值仿真模型,并实现了其基于通用 CAE 软件的数值求解.

2) 模型采用随碾压次数和温度而非连续变化的层厚、材料热物性和洒水散热条件,以及按实时状态修正的对流、向内辐射与向外辐射子模型.通过初始温度场的反复迭代,实现了非连续性条件在连续场分析中的应用.上述特点使得本模型可根据环境条件预估铺筑过程温度场的实时变化.

3) 不同条件下仿真检验证明,本数值预估模型具有较高的可信性和仿真一致性.

### 参考文献:

- [1] JORDAN P G, THOMAS M E. Prediction of cooling curves materials for hot-mix paving by a computer program (LR729) [R]. London: Transport and Road Research Laboratory, 1976.
- [2] CHADBOUM B A, NEWCOMB D E, VOLLER V R, et al. An asphalt paving tool for adverse conditions (MN/RC-1998-18) [R]. Minneapolis: Minnesota Department of Transportation, 1998.
- [3] 孙洁. 热拌沥青混合料施工压实过程中温度场变化规律研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学交通运输学院, 2009.
- SUN Jie. Research on change law of temperature field of the HMA compacting [D]. Changsha: School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, 2009. (in Chinese)
- [4] 张志峰, 孙杨勇. 热拌沥青混合料降温规律分析 [J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2009, 7: 10-12.
- ZHANG Zhi-feng, SUN Yang-yong. Hot asphalt mixture cooling law analysis [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development: Application Technology Edition, 2009, 7: 10-12. (in Chinese)
- [5] DELLERT R B. Vibratory compaction of thin lift asphalt resurfacing [C] // Asphalt Paving Technology 1977 (Vol. 47), Linolakes: Association of Asphalt Paving Technologists, 1977: 287-293.
- [6] 黄慧. 沥青及沥青混合料热物特性及测试方法研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学学院交通运输学院, 2010.
- HUANG Hui. Thermophysical properties and test of asphalt and asphalt mixture [D]. Changsha: School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, 2010. (in Chinese)
- [7] WILLIAMSON R H. Effects of environment on pavement temperatures [C] // The 3rd International Conference on Structural Design of Asphalt Pavement. London: International Society for Asphalt Pavements, 1972: 144-158.
- [8] SOLAIMANIAN M, KENNEDY T W. Predicting maximum pavement surface temperature using maximum air temperature and hourly solar radiation (TRR1417) [R]. Washington D C: Transportation Research Board, 1993.
- [9] 贾璐. 沥青路面高温温度场数值分析和实验研究 [D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2004.
- JIA Lu. Numerical analysis and experimental research of high temperature fields in asphalt pavement [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2004. (in Chinese)
- [10] 戴寿申. 应用太阳辐射通量和云量的历史资料进行紫外线辐射强度预报 [J]. 科技信息, 2010, 18: 32-33.
- DAI Shou-shen. Ultraviolet radiation intensity forecast by history data of solar radiation flux and cloud cover [J]. Science and Technology Information, 2010, 18: 32-33. (in Chinese)
- [11] BLISS R. Atmospheric radiation near the surface of the ground: a summary for engineers [J]. Solar Energy, 1961, 5: 103-120.
- [12] 廖启龙, 王宝林. 现代气候学原理 [M]. 北京: 气象出版社, 1994: 248-249.
- [13] 陈森. 沥青路面 FWD 标准检测规程与弯沉修正温度研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学土木建筑学院, 2011.
- CHEN Sen. Study on FWD standard testing protocol and temperature correction for deflection of asphalt pavement [D]. Chongqing: School of Civil Engineering Architecture and Construction, Chongqing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [14] 吴赣昌. 层状路面体系温度场分析 [J]. 中国公路学报, 1992, 5(4): 19-27.
- WU Gan-chang. Temperature field analysis of layered pavement system [J]. China Journal of Highway And Transportation, 1992, 5(4): 19-27. (in Chinese)

(责任编辑 郑筱梅)