

文章编号:1671-6833(2013)04-0015-04

## 低温工况下沥青路面压实特性研究

徐晓玮<sup>1</sup>, 穆柯<sup>2</sup>

(1. 西安市市政工程质量监督站, 陕西 西安 710003; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068)

**摘要:** 为了研究混合料密实度对温度的敏感性, 在室内进行了不同温度、击实次数下的马歇尔试件密实度试验, 确定了压实温度对沥青混合料压实性能的影响; 建立了基于热传导学原理的混合料摊铺温度散失有限元模型, 对低温工况下混合料温度散失规律进行研究, 并通过实测数据对计算模型进行验证分析. 研究表明: 温度低于 100 ℃ 时, 即使增加击实功也很难使混合料达到 98% 以上的压实度; 低温环境下摊铺层厚度越小, 沿深度方向混合料温度分布越离散, 压实难度越大; 摊铺厚度以 2 cm 梯度从 10 cm 降低到 4 cm 时, 有效碾压时间分别降低 9.7%、25% 和 24%.

**关键词:** 道路工程; 低温压实; 温度散失; FEM

**中图分类号:** U416

**文献标志码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2013.04.004

### 0 引言

压实度是评判沥青路面功能优劣的重要指标之一, 沥青面层施工过程中, 良好的压实质量是道路密实性、稳定性、耐久性的保障, 此外道路的平整度、行车舒适性等指标也均需在路面充分压实的过程中实现. 作为典型的黏弹性材料, 沥青混合料压实度具有很强的温度敏感性. 根据 JTG D50—2006《公路沥青路面施工技术规范》<sup>[1]</sup> 规定: 一级公路施工气温低于 10 ℃, 其他公路低于 5 ℃ 时, 不宜进行热拌沥青混合料铺筑. 但对于部分昼夜温差大, 气温下降快的地区, 或工期紧张项目, 低温环境下进行面层施工却又难以避免. 目前碾压施工过程主要依赖经验(如观察出现较深的碾压轮迹)进行控制, 施工过程中如遇压实设备跟进不及时、碾压不充分等情况, 错过了最佳碾压时段, 往往会造成冷压、干压, 反而会造成路面结构施工期的破坏. 目前, 部分学者针对沥青路面低温工况下的压实工艺、施工组织设计等已进行了系统研究<sup>[2-3]</sup>, 对于混合料低温状态下的路用性能, 也有了大量的试验数据支撑<sup>[4-6]</sup>, 但这些研究相对独立, 缺乏较强的关联性. 笔者在总结已有研究成果基础上, 通过进行室内压实试验, 系统分析了 150, 140, 130, 120, 100 ℃ 温度下混合料压实功与密实度的关系, 定量研究了温度对混合料压实

特性的影响, 同时建立了混合料摊铺过程温度散失有限元模型, 对低温施工情况下混合料温度散失规律进行研究, 提出其相应的有效碾压时间段落, 为低温状态下沥青路面施工提供参考.

### 1 温度对压实度影响

为了研究压实度与温度的关系, 笔者在 150, 140, 130, 120, 100 ℃ 温度下成型了厚度为 63.5 mm 的试件, 测量不同击实功下混合料的密度, 并换算为理论密实度<sup>[7]</sup>, 结果如图 1 所示.

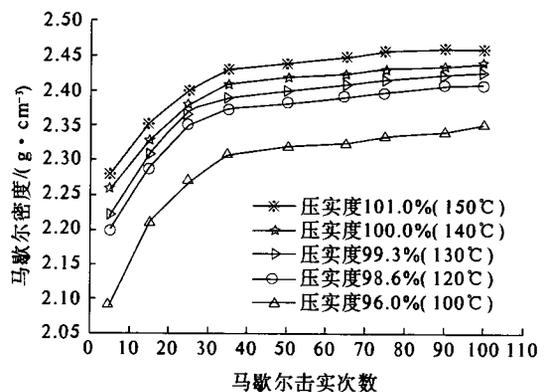


图 1 不同温度下压实度与击实次数关系

Fig. 1 Curve of compactness and compaction times under different temperature

由图 1 可知: 压实前期, 随着压实功的增加, 混合料密度迅速增加, 30 次正反击实之后混合料

收稿日期: 2013-04-27; 修订日期: 2013-06-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2012CB026106-1)

作者简介: 徐晓玮(1988-), 女, 陕西西安人, 工程师, 主要从事沥青路面研究, E-mail: xuxw2012@163.com.

密度增长开始放缓,其中温度越低混合料越难以压实;在高温状态下,如 150 ℃,仅需 30 次正反击实就能达到 100 ℃ 条件下 100 次击实效果,

取 100 ℃ 工况下的压实曲线进行分析发现,在该温度情况下,及时进行正反 100 次的击实,其马歇尔密度最多可以达到 2.35 g/cm<sup>3</sup>,只能达到 96% 的压实度(理论密度 2.45 g/cm<sup>3</sup>),而规范中对上面层压实度为不低于 98%。因此可以认为:当混合料温度低于 100 ℃ 时加大压实功,进行多遍击实,压实度也很难达到规定的压实度。

## 2 混合料温度散失有限元模型

### 2.1 理论基础

(1) 大气与路面对流换热. 道路表面与空气气流之间由于温差引起的热流交换形成为对流换热,表示为  $P$ :

$$P = \alpha_r (T_a - T_s). \quad (1)$$

大气温度受自然界很多因素影响,但仅就单日气温分布而言,气温变化可用下式描述<sup>[8]</sup>:

$$T_a(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{12} [a_k \cos k\omega_0 t + b_k \sin k\omega_0 t]. \quad (2)$$

(2) 路面辐射热交换. 路面温度场分析时,将辐射换热计算为大气辐射到路表的热能与被路面吸收热能之差<sup>[8]</sup>,表示为

$$q_s = h_r (T_{ak} - T_{sh}) = h_r (T_a - T_s). \quad (3)$$

(3) 进入路表的热流量. 考虑到路面的吸收率  $\alpha_s$ , 以  $q$  表示进入路表总热流.

$$q = \alpha_s Q(t) + B(T_a - T_s). \quad (4)$$

式中:  $B$  为道路表面复合换热系数,  $B = \alpha_r + h_r$ .

### 2.2 模型的建立

笔者依据工程西商高速实际路面结构进行建模,上面层厚度为 4 cm AC-16,中面层为 6 cm 中粒式密级配沥青碎石 AC-20,下面层为 ATB-25,基层为 38 cm 水泥稳定碎石,如图 2 所示. 参考国内外温度场建模方法<sup>[9]</sup>,模型长为 300 cm,深度为 60 cm,几何模型及网格剖分如图 3 所示.

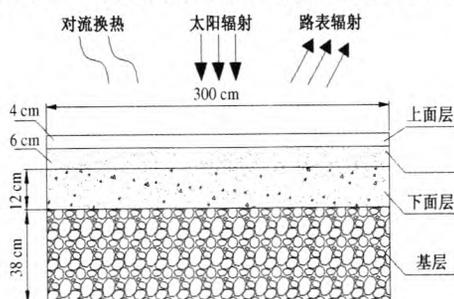


图 2 路面结构示意图

Fig. 2 Schematic drawing of pavement structure

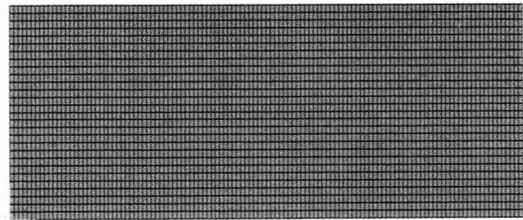


图 3 路面温度场分析网格剖分

Fig. 3 Mesh generation of pavement structure

在室内试验及查阅文献的基础上选取沥青混合料、半刚性基层材料热传导参数<sup>[10-11]</sup>,见表 1 所示.

表 1 路面结构温度场计算参数

Tab. 1 Parameters for pavement temperature field calculation

参数	面层	基层	底基层
导热系数/ (K/(m·h·℃))	4 320	5 256	4 788
密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	2 400	2 300	2 100
热容/ (J/(kg·℃))	955	912	943
外界温度/℃		10	
摊铺温度/℃		150	
混合料表面降温速率/ (℃·min <sup>-1</sup> )		5-9.2	
太阳辐射吸收率 $\alpha_s$		0.90	
路面发射率 $\varepsilon$		0.81	
绝对零度值 $T_s$ /℃		-273	
Stefan-Boltzman		2.041092E-4	

## 3 计算分析

依据表 1 所述工况,选取 10 ℃ 为低温环境,假定混合料摊铺温度为 150 ℃,对混合料被摊铺之后的热量传导、温度沿深度方向分布状况以及不同摊铺厚度下混合料温降规律进行计算分析,结果如图 4~6 所示.

图 4 为不同时刻路面热流分布规律,由图可知:随着摊铺时间的流逝,路面 2 cm 深度处热流量交换逐步下降并最终趋近于 0,且前期降幅较大,后期平缓;路面 4 cm 深度处(摊铺层与下卧层界面)热流量交换逐步增加,说明随时间流逝摊铺混合料的热量快速向下传递.从热流交换上看路面厚度 0~4 cm 位置处稳步下降,4~12 cm 处温度呈上升趋势,路面深度大于 12 cm 时,基本不受摊铺混合料影响.

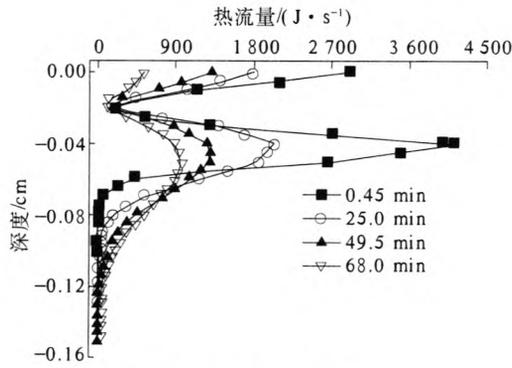


图4 不同时刻路面热流量分布

Fig. 4 Changing of heat-flux with time

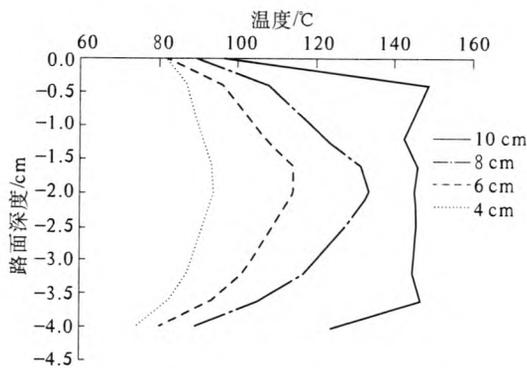


图5 摊铺10 min 不同路面深度处混合料温度

Fig. 5 Temperature distribution in structure after paving 10 minutes

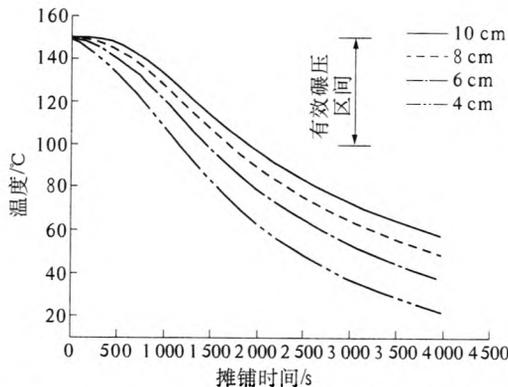


图6 不同摊铺厚度下路面有限碾压时间预估

Fig. 6 Prediction of effective compaction time under different paving depth

图5为不同摊铺厚度下路面温度分布规律,由图5可知:随着时间的增加各摊铺厚度下路面结构内温度均呈下降态势,路面厚度由10 cm降低至4 cm时,结构层内混合料最高温度分别降低8.5%、14.5%、17.9%;路面厚度越小,温度沿路面深度分布越不均匀,越不利于混合料的压实。

由图6可知,随着路面摊铺厚度的增加,混合料温度散失速率逐渐变慢,根据前述研究结论,当

混合料温度低于100 °C时很难再被压实,因此取100 °C作为混合料有效压实的极值点,混合料温度在100 °C前的时间段为结构层有效碾压区间,摊铺厚度分别为10,8,6,4 cm时,有效碾压时间分别为31,28,21,16 min。

#### 4 试验路实测验证

为了验证笔者所建立的温度预估模型准确性,笔者依托西商高速实体工程,采用优利德235型温度传感器对摊铺过程中混合料温度散失数据进行实测。

该处摊铺时间为12 h,混合料摊铺温度为171 °C,气温15 °C、下面层表面温度13.7 °C,持续观测时间47 min,并将实测数据与预估数据进行对比,如图7所示。

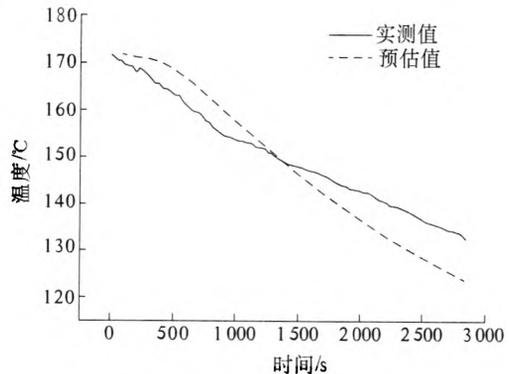


图7 现场实测值与预估值对比

Fig. 7 Construct actual values with estimated

由图7可知:笔者所建立的路面摊铺过程中温度散失有限元预估模型具有可靠的预估精度,现场实测值与预估值最大误差为6.7%,从曲线走势上看,2 cm深度处前1400 s预估值高于实测值,之后预估结果开始小于实测结果。

#### 5 结论

(1)较高的碾压温度是沥青路面有效压实的重要保证,当混合料温度低于100 °C时,即使增加碾压设备台班或碾压变数也很难达到理想的压实效果,达到相同的压实目标,高温碾压所需的压实功仅为低温条件下的30%~50%。

(2)低温环境下,摊铺层厚度越小,沿深度方向混合料温度分布越离散,压实质量越难以控制;反之如摊铺层厚度较大,则保温效果相对较好,路面厚度分别为10 cm,8 cm,6 cm,4 cm时,有效碾压时间分别为31 min,28 min,21 min,16 min。

(3)笔者建立的基于热传导学原理的混合料

温度散失预估模型具有较高的精度,可以用于不同外界环境下混合料温度散失的预估,为低温条件下路面施工提供参考依据。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国行业标准. JTG D50—2006 沥青路面施工技术规范[S]. 北京:人民交通出版社,2006.
- [2] 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.
- [3] AZARI H, RECHARD H M, STUART K D. Optimum compaction temperature for modified binders[J]. Journal of Transportation Engineering, 2003, 129(5):531-537.
- [4] 张争奇,袁迎捷,王秉纲. 沥青混合料旋转压实密实曲线信息及其应用[J]. 中国公路学报,2005,18(3):1-4.
- [5] 李波,岳永和,窦晖,等. 温拌沥青混合料施工中温度场的时空特性[J]. 武汉理工大学学报:工学版,2011,33(4):61-64.
- [6] 贾璐. 沥青路面高温温度场数值分析和实验研究[D]. 长沙:湖南大学土木工程学院,2004.
- [7] 杨学良,刘伯莹. 沥青路面温度场与结构耦合的有限元分析[J]. 公路交通科技,2006,23(11):1-9.
- [8] HERMANSSON A. Simulation model for calculating pavement temperature including maximum temperature[J]. Transportation Research Record, 2000, 1699:134-141.
- [9] 冯德成,胡伟超,于飞,等. 沥青路面材料热物性参数对温度场的影响及敏感性分析[J]. 公路交通科技,2011,28(11):12-18.
- [10] 王辉,李雪连,张起森. 高温重载作用下沥青路面车辙研究[J]. 土木工程学报,2009,42(5):139-144.
- [11] 马磊,胡浩,汪海年. 考虑温度非均匀性的沥青路面温度应力分析[J]. 长安大学学报:自然科学版,2011,31(1):1-5.

## Study on Compaction Characteristics of Asphalt Pavement under Low Temperature

XU Xiao-wei<sup>1</sup>, MU Ke<sup>2</sup>

(1. Xi'an Municipal Engineering Quality Supervision Station, Xi'an 710003, China; 2. The First Highway Survey and Design Institute Co. Ltd., Xi'an 710068, China)

**Abstract:** In order to study the influence of temperature on compaction degree, theory density change rule of Marshall specimens was studied under different temperatures and compaction times. A mixture temperature lost model was established based on heat conduction theory to study asphalt mixture heat losing under low temperature, this model was also verified by observation data. The results show that: asphalt mixture was difficult to be compact to 98% degree under 100 °C. As thin as the pavement was, the temperature distributed more scattered and the compaction become more hard. Thickness of pavement decreases from 10 cm to 4 cm by 2 cm grads, the effective rolling time decreases by 9.7%, 25%, 24%.

**Key words:** road engineering; low temperature compaction; heat loss; FEM