

文章编号: 0451-0712(2005)11-0106-06

中图分类号: U416.217

文献标识码: A

# 沙漠地区典型沥青混凝土路面结构 温度场的仿真分析

宋存牛<sup>1</sup>, 王选仓<sup>2</sup>, 赵光海<sup>3</sup>

(1. 长安大学理学院 西安市 710064; 2. 长安大学公路学院 西安市 710064; 3. 长安大学 西安市 710064)

**摘 要:** 为了确定沙漠地区高等级路面结构温度变化规律, 提供路面工作环境温度指标, 利用文献[1]建立的层状路面结构非线性温度场的数学模型和计算方法, 对内蒙古自治区沙漠地区典型气候条件下, 典型路面结构温度场、温度变化速率以及温度梯度进行了仿真分析, 分析结果能够为沙漠地区高等级路面设计和材料选择提供理论依据和指导作用。

**关键词:** 沥青混凝土路面; 温度场; 温度梯度; 沙漠地区

温度场的研究是针对各地道路所处的具体环境, 揭示在最不利的自然环境下, 路面温度场的变化规律及其影响因素, 探索道路性能与环境主要因素之间的联系, 预测路面在设计年限内路面温度极端情况, 确保路面具有足够的高温稳定性和低温抗裂性。沙漠地区自然环境恶劣, 夏天温度特别高, 容易引起沥青混凝土面层的推挤和车辙; 冬天温度很低,

会使沥青混凝土面层形成温缩裂缝。过去修建的二、三级公路已经不能满足西部发展需要, 随着我国公路建设向西部转移, 沙漠地区修建高等级公路将是未来发展趋势。文献[1]中作者建立了层状路面结构温度场的数学模型和计算方法, 利用它能够根据气象资料 and 材料热物参数, 方便、准确地确定出路面结构内的温度分布。通过对内蒙古沙漠公路 207 国道

基金项目: 西部交通建设科技项目(2001-318-772-05); 长安大学科技发展基金项目(0305-1001)

收稿日期: 2005-04-11

究[J]. 岩土力学, 2004, 25(增).

[2] 山东省交通厅公路局, 北京科技大学, 等. “公路工程灾害预防与治理综合技术研究及工程应用”国家科技进步奖申报材料[R]. 济南: 山东省交通厅公路局, 2003.

[3] 山东大学土建与水利学院. 济南高速外环南线路基沉降加固治理设计施工图[R]. 济南: 山东大学, 2004.

[4] 山东大学土建与水利学院. 省道 327 线路路基沉降加固治理设计施工图[R]. 济南: 山东大学, 2004.

## Preventive Technology for Sideslip of Highway Subgrade

WANG Song-gen

(Highway Bureau of Communication Department of Shandong Province, Jinan 250002, China)

**Abstract:** The sideslip of highway subgrade consists of a serious menace to the construction and working of the highway. Moreover, this kind of destruction commonly is both paroxysmal and dangerous. On the other hand, owing to the complicated field circumstance, so the treatment of this kind of project is full of difficulties. In connection with a number of project examples, this matter is introduced exhaustively in this paper, it has reference value for similar projects.

**Key words:** highway subgrade; sideslip; reinforcement technology

K135+000处路面温度的测试与计算,验证了该方法合理可信。为了确定沙漠地区高等级路面温度变化规律,提供路面工作环境温度指标,本文利用该方法对内蒙古自治区沙漠地区典型气候条件下,典型路面结构温度场、温度变化速率以及温度梯度进行了仿真分析,得到的结论能够为沙漠地区高等级路面设计和材料选择提供理论依据和指导。

### 1 沥青混凝土路面结构温度场分析

典型路面结构为:15 cm 沥青混凝土+20 cm 水泥稳定砂砾+30 cm 二灰土+沙基。沥青混凝土路面结构热物参数和典型气候参数见表1和表2。

表1 沥青混凝土路面结构热物参数

热物参数	面层	上基层	下基层	沙基
导热系数/(W/(m·K))	1.2	1.4	1.3	1.3
导温系数/(m <sup>2</sup> /s)	0.002 2	0.002 8	0.002 6	0.003 0

表2 典型气候条件气象参数

时间	日最高气温	日最低气温	日太阳辐射量	风速	日照时间
	C	C	MJ	m/s	h
夏季	34.5	16	29	2	13
冬季	-14.5	-26	8	3	7

图1是在夏季典型气候条件下,沥青混凝土路面结构温度日变化的曲线。图1清楚表明:路表最高温度出现在14:00左右,最高温度达66℃,而最低温度一般出现在清晨5:00左右;路表温度日波动量最大,约为48.7℃,而5 cm 面层中部、水泥稳定砂砾基层顶部15 cm处和30 cm深处温度日波动量分别为34.5℃、16.5℃和4.5℃左右,在二灰土底基层中温度日波动量已经不足1℃;相对于路表而言,路面结构5 cm、15 cm和30 cm深处温度日变化时间差为1 h、3 h和6 h。

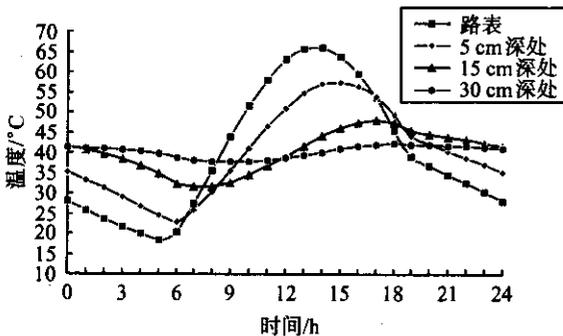


图1 夏季沥青混凝土路面结构温度日变化曲线

图2是在冬季典型气候条件下,沥青混凝土路面结构温度日变化的曲线。从图2可看出:路表最低温度出现在6:00左右,最低温度在-26℃以下,而最高温度一般在13:00左右达到;路表温度日波动量为25.5℃,而5 cm 面层中部、水泥稳定砂砾基层顶部15 cm处和30 cm深处温度日波动量分别为17.8℃、8.9℃和2.5℃左右;相对于路表而言,路面结构5 cm、15 cm和30 cm深处温度日变化时间差为1 h、2 h和8 h。

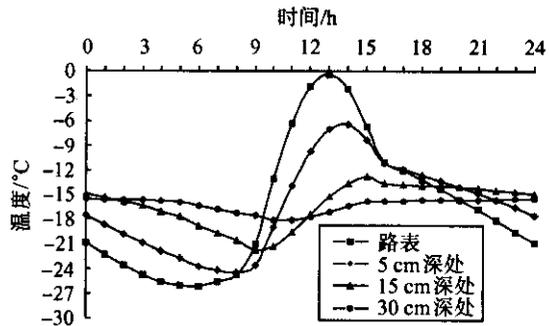


图2 冬季沥青混凝土路面结构温度日变化曲线

比较图1和图2表明:冬季路表最高温度较夏季提前1 h出现,最低温度比夏季晚1 h到达;夏季路表温度日波动量远比冬季温度日波动量大。夏季持续高温时期,气温高达40℃以上,太阳辐射强烈,路面结构温度大多数天气处于50~66℃之间,温度日波动在40~50℃之间变化。冬季持续低温时期,天气寒冷,太阳辐射量较低,沥青混凝土路面结构温度长期处于-20~-30℃低温状态,温度日波动量在25℃左右变化。

图3是在夏季气候条件下路面结构温度随深度分布的曲线,表明沿路面深度方向的温度场为非线性分布,温度仅在路面结构深度0~45 cm内变化比较明显。路表温度达到最大时,距路表8~9 cm处温度变化量减小1/2;离路表15 cm处,温度变化量进一步减小,到底基层45 cm深度以下时温度变化已经十分不明显。因此,研究和设计路面结构时,涉及沥青混凝土路面温度如温缩裂缝、低温抗裂等问题时,应着重对路面结构内的温度进行分析,可以忽略温度对底基层以下结构的影响。

### 2 沥青混凝土路面温度变化速率

#### 2.1 温度变化速率分布

图4和图5分别是在典型气候条件下,沥青混凝土

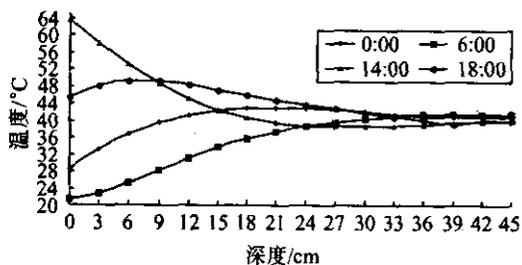


图3 夏季沥青混凝土路面结构温度随深度变化曲线

路面变温速率日变化曲线。沥青混凝土路面温度变化速率随时间周期性变化,最大变温速率发生在路表。最大降温速率夏季在18:00点左右达到,为 $-9.3\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ ;冬季在15:30左右出现,为 $-6.7\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 。随着深度增加,温度变化波动延迟量逐渐增加,波动幅度以指数形式衰减,到5 cm 面层处、15 cm 面层底和25 cm 基层深处,夏季和冬季降温速率最大值分别为 $-5.9\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 和 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 、 $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 和 $-3.7\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 以及 $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 和 $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ ,衰减至路底以下,变温速率已接近于零。而最大升温速率夏季在8:30左右出现,为 $8.39\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ ;冬季则在9:00左右出现,为 $8.2\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 。路表温度变化速率主要在5:00~17:00之间变化明显,清晨6:00到下午13:00左右温度变化速率为正,使沥青混凝土面层受到压应力;其余时间变温速率为负,使沥青混凝土路面受到拉应力。路面长时间经历拉应力和压应力周期性交替变化,沥青混凝土路面很容易产生疲劳破坏。就沙漠地区冬季正常气候而言,路表降温速率在 $6\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 之间变化。

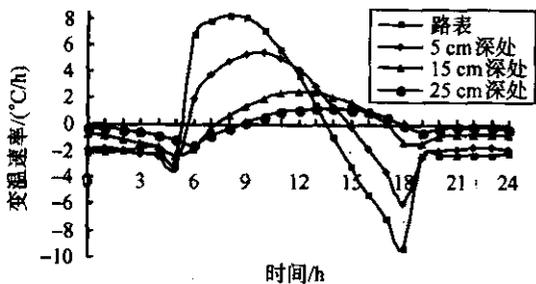


图4 夏季沥青混凝土路面结构变温速率日变化曲线

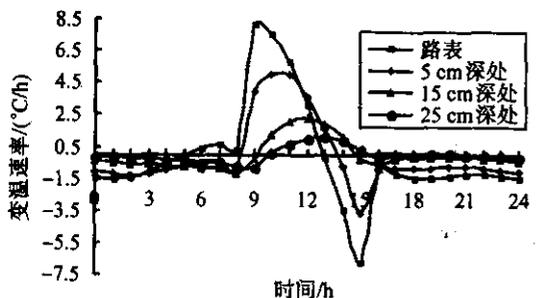


图5 冬季沥青混凝土路面结构变温速率日变化曲线

## 2.2 温度变化速率影响因素

### 2.2.1 气温的影响

气温是影响路表变温速率的最重要因素,而我们最关心的是路表最大降温速率。在正常的典型气候条件下,日温差每增加 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,夏季最大降温速率增加 $0.045\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ ,冬季为 $0.008\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 。图6是在太阳辐射量为 $8.0\text{ MJ}$ 、风速为 $3\text{ m/s}$ 的冬季气候条件下,不同日温差条件下路表变温速率日变化曲线。图7是太阳辐射量为 $29.0\text{ MJ}$ 、风速为 $2\text{ m/s}$ 的夏季气候条件下,不同日温差条件下路表变温速率日变化曲线。最大升温速率变化随日温差增大而增大,但温差每增加 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,温度变化速率也不超过 $1\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 。日温差变化对最大降温速率的影响很小。

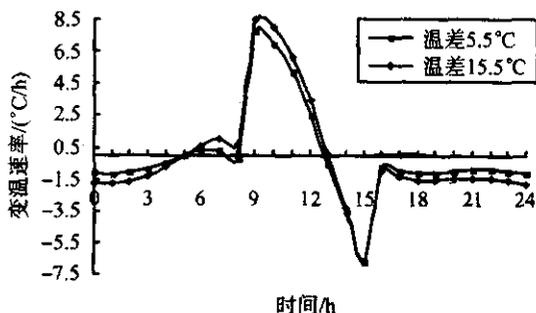


图6 不同日温差条件下冬季路表变温速率日变化曲线

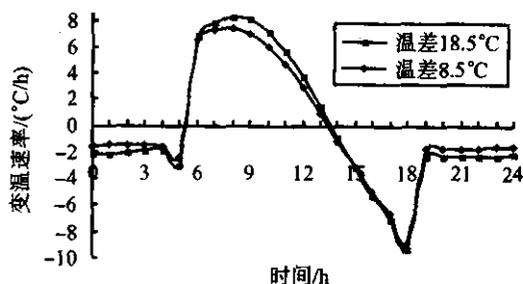


图7 不同日温差条件下夏季路表变温速率日变化曲线

### 2.2.2 风速的影响

图8是在温差为 $11.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、太阳辐射量为 $8\text{ MJ}$ 情况下,不同风速冬季正常气候条件下路表温度变化速率日变化曲线,表明风速越大,最大变温速率将增大。特别是在初冬季的大幅度连续降温天气,往往伴随着大风,气温急剧下降,引起路表最大降温速率突然增大。由于沥青混凝土面层是粘弹性材料,面层中产生的温度应力来不及通过应力松弛抵消而逐渐积累起来,当超过材料抗拉强度时,沥青混凝土面层很容易产生温缩裂缝。因此,分析沙漠地区路面温度变化速率时应着重关注大幅度降温时期和寒潮过程情况。

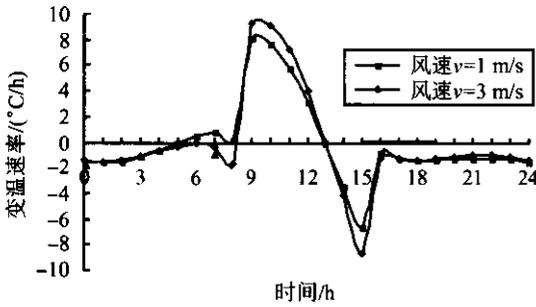


图8 不同风速冬季路表变温速率日变化曲线

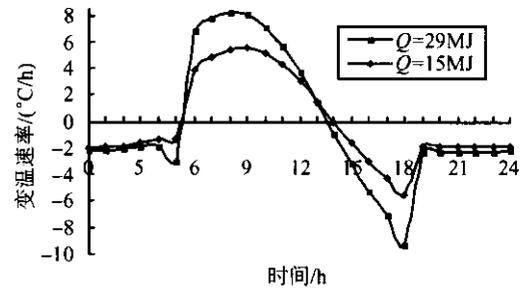


图9 不同太阳辐射量夏季路表变温速率日变化曲线

2.2.3 太阳辐射量的影响

图9是温差为18.5℃、风速为2 m/s时,不同太阳辐射量夏季气候条件下路表变温速率日变化曲线,表明辐射量越强,最大变温速率越大,否则相反。保持其他参量相同,太阳辐射量每增加或降低4.2 kJ,最大升温速率在夏季增加0.84℃/h,在冬季增加2.85℃/h;最大降温速率在夏季降低1.16℃/h,在冬季降低3.06℃/h。

2.2.4 路面材料的影响

表3是温差为11.5℃、太阳辐射量为8 MJ时,路面不同材料导热系数与路表最大变温速率的关系。从表3可看出:导热系数每增大0.1 W/(m·K),最大升温速率将减小,最大降温速率绝对值也减小,变化量为0.1~0.2℃/h。基层材料对最大变温速率的影响,除了隔温材料之外,其他基层材料影响甚微。

表3 最大变温速率随面层和基层材料导热系数的变化

导热系数/(W/(m·K))		1.1(0.6)	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
导温系数/(m <sup>2</sup> /s)		0.002 0	0.002 2	0.002 5	0.002 8	0.003 1	0.003 4
面层材料变化	最大升温速率/(℃/h)	8.35	8.13	8.01	7.89	7.78	7.67
	最大降温速率/(℃/h)	-6.81	-6.67	-6.58	-6.51	-6.43	-6.36
基层材料变化	最大升温速率/(℃/h)	8.39	8.15	8.14	8.13	8.12	8.11
	最大降温速率/(℃/h)	-6.76	-6.67	-6.67	-6.66	-6.66	-6.66

注:0.6 W/(m·K)是基层材料导温系数为0.002 m<sup>2</sup>/s时对应的导热系数。

3 沥青混凝土路面温度梯度

路面结构温度应力不仅与变温速率有关,而且与沿深度变化的温度梯度有关系,在研究路面低温开裂以及优化路面设计和材料选择时,特别是采用半刚性基层沥青混凝土路面时,研究沥青混凝土路面中的温度梯度分布至关重要。

3.1 温度梯度分布

图10和图11分别是在典型气候条件下,路面不同深度温度梯度日变化曲线。路面最大温度梯度发生在路表,并且最大正温度梯度比最大负温度梯度绝对值大,因此,计算涉及温度梯度产生的温度应力时应以正温度梯度作为依据。正温度梯度夏季持续10 h左右,而冬季持续8 h左右。路表夏季零温度梯度出现在清晨6:00~7:00和下午16:00~17:00之间;而冬季则出现在上午7:00~8:00和下午15:00~16:00;相对于夏季而言,冬季分别推迟和提前1 h

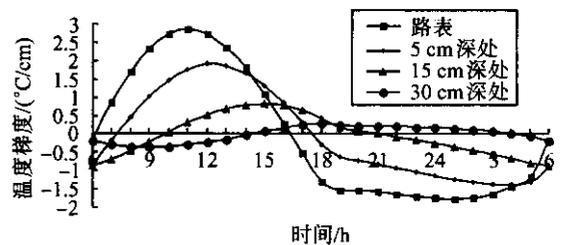


图10 夏季路面结构温度梯度日变化曲线

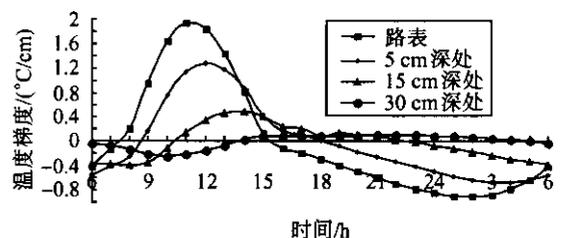


图11 冬季路面结构温度梯度日变化曲线

到达。最大正温度梯度在上午11:00左右达到,夏季和冬季分别为 $2.86\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 和 $1.93\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 。随深度增加,温度梯度波动幅度越来越小,到5 cm 面层处、15 cm 面层底深处,夏季和冬季温度梯度波幅减为 $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 、 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 和 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 、 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ ;至上基层30 cm处,夏季温度梯度波幅为 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 。

### 3.2 温度梯度影响因素

#### 3.2.1 气温的影响

气温影响主要是日气温振幅,而非日平均气温或最高、最低温度。图12是太阳辐射量为29 MJ,不同温差条件下,11:00时路面结构温度梯度随深度变化曲线。在其他条件相同时,气温振幅每增加 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,路表最大温度梯度夏季增加 $0.069\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ ,冬季增加 $0.068\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 。同时也可看出,路面结构温度梯度随深度迅速衰减,在面层 $0\sim 20\text{ cm}$ 之间,变化较大。

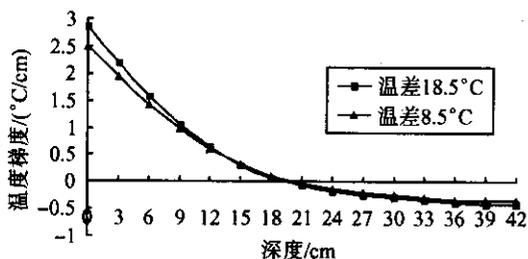


图12 不同日温差条件下温度梯度随深度变化曲线

#### 3.2.2 太阳辐射量的影响

太阳辐射量对温度梯度也有较大影响,图13是温差为 $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,不同太阳辐射量,11:00时路面温度梯度随深度变化曲线。太阳辐射愈强,路表温度愈高,加速路表热流向下传递,温度梯度大,否则相反。当太阳辐射量增加 $4.2\text{ kJ}$ ,路表最大温度梯度夏季增加 $0.574\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ ,而冬季增加 $0.269\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 。

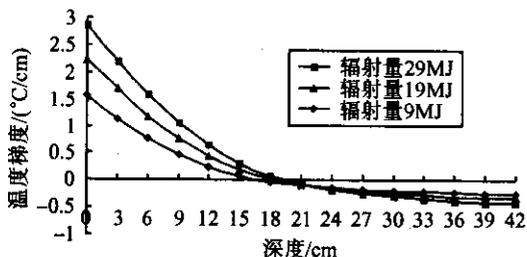


图13 不同太阳辐射量条件下温度梯度随深度变化曲线

#### 3.2.3 风速的影响

图14是路面最大温度梯度以及相同时刻9 cm

和15 cm 深度处温度梯度随风速的变化曲线,表明最大温度梯度随风速增大而减小。这是因为风速越大,路表热量交换越快,从而减小了热量沿路面深度方向传递,导致路表最大温度梯度减小。风速越大,温度梯度随深度变化稍有变缓趋势。其他条件相同时,风速每增加 $1\text{ m/s}$ ,最大温度梯度减小量在 $0.06\sim 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 之间。面层底温度梯度变化相当不明显。

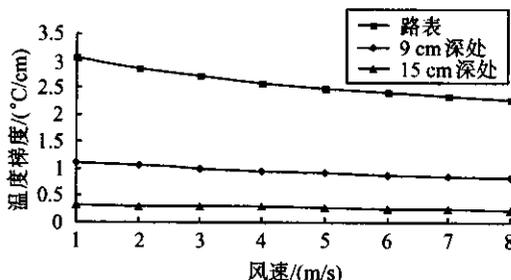


图14 风速对路面温度梯度影响曲线

#### 3.2.4 路面材料的影响

图15和表4是在夏季气候条件下,路面结构不同材料导热系数与路面最大温度梯度和面层底部温度梯度的关系。面层导温系数增大,路表向下传递的热流加快,沿深度方向单位距离的温差减小,因此温度梯度减小。导热系数每增加 $0.1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时,最大温度梯度减小 $0.1\sim 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 。面层底部温度梯度随材料导热系数增大而增大,但变化不大。基层材料对路表温度梯度的影响,除隔温材料之外,其他材料热物参数的影响十分有限,工程应用中可以不考虑。

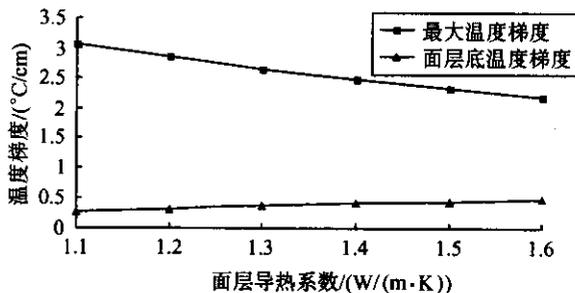


图15 面层材料导热系数对温度梯度的影响曲线

## 4 结论

(1)沿路面结构深度方向温度场为非线性分布,温度仅在路面结构内( $0\sim 45\text{ cm}$ )变化比较明显,距路表 $8\sim 9\text{ cm}$ 处,温度变化减小到 $1/2$ ,到 $40\text{ cm}$ 深处以下底基层后温度变化已经十分不明显。

表4 最大温度梯度随面层材料导热系数变化

导热系数/(W/(m·K))		1.1(0.6)	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
导温系数/(m <sup>2</sup> /s)		0.002 0	0.002 2	0.002 5	0.002 8	0.003 1	0.003 4
面层变化	最大温度梯度/(°C/cm)	3.07	2.86	2.65	2.47	2.32	2.19
	面层底温度梯度/(°C/cm)	0.27	0.31	0.37	0.42	0.45	0.48
基层变化	最大温度梯度/(°C/cm)	2.74	2.85	2.86	2.86	2.87	2.87
	面层底温度梯度/(°C/cm)	0.32	0.31	0.37	0.42	0.45	0.48

注:0.6 W/(m·K)是基层材料导温系数为0.002 m<sup>2</sup>/s时对应的导热系数。

(2)沙漠地区夏季路面温度大多数天气处于50~66℃之间,温度日波动在40~50℃之间变化;冬季路面长期处于-20~-30℃低温状态,温度日波动量在25℃左右变化。夏季路表最高温度高达66℃,温度日波动量约为48.7℃;冬季最低温度达-26℃以下,路表日波动量约为25.5℃。15 cm和30 cm深度处温度日波动量大约衰减为路表日波动量的1/3和1/10。

(3)路表最大降温速率夏季在18:00点左右出现,为-9.3℃/h;冬季在15:30左右出现,为-6.7℃/h。而最大升温速率夏季在8:30左右出现,为8.39℃/h;冬季则在9:00左右出现,为8.2℃/h。随深度增加,温度变化波动幅度以指数形式衰减,就沙漠地区正常气候而言,路表降温速率在6~10℃/h之间变化。

(4)夏季路表最大温度梯度在上午11:00左右出现,为2.86℃/cm。随深度增加,夏季温度梯度波动幅度越来越小,到5 cm面层处、15 cm面层深处,温度梯度波幅减为1.9℃/cm、0.8℃/cm;至30 cm上基层处,温度梯度波幅为0.3℃/cm。相对于夏季而言,冬季温度梯度及波幅要小一些。

(5)影响路面温度、变温速率和温度梯度的主要因素除气温和太阳辐射量外,还有材料热物参数和风速。面层材料热物参数影响较大,基层材料除了保温材料之外影响很小。风速增大,路表最高和最低温度降低,最大变温速率增大,最大温度梯度减小。

#### 参考文献:

- [1] 宋存牛. 层状路面结构体非线性温度场研究概况[J]. 公路,2005,(1).

## Emulation Analysis on Temperature Field of Typical Asphalt Concrete Pavement Structure in Desert Areas

SONG Cun-Niu<sup>1</sup>, WANG Xuan-cang<sup>2</sup>, ZHAO Guang-hai<sup>3</sup>

(1. College of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Highway College, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** In order to define pavement temperature field distribution in desert areas and offer temperature indexes of pavement working environment. The mathematical model and the calculated method of non-linear temperature field of layered pavement structure are set up by using the reference [1], the typical pavement structural temperature field, temperature variation rate and temperature gradient are simulated, and influencing factors under typical Inner Mongolia climate condition in the desert area analyzed. The results offer theoretical basis for high-type pavements design in the desert area and materials selection.

**Key word:** asphalt concrete pavement; temperature field; temperature gradient; desert area