

文章编号:1671-6833(2012)06-0121-04

# 不同热边界条件下热管对沥青混凝土换热特性的影响

彭振宇

(山西省交通科学研究院,山西太原 030006)

**摘要:** 沥青混凝土在阳光的照射下会迅速升温,影响路面的高温稳定性.热管是一种理想的散热、均热和热能输送元件,可有效降低路面内的升温速率.采用数值模拟方法,建立了沥青混凝土的三维模型,考虑了有、无热管两种情况,对距路面不同深度位置的温度-时间响应特性进行了计算,并分析了路面吸热和放热两种不同热边界条件对换热特性的影响.计算结果表明,在加热过程中,热管会显著降低路表温度,最高降温幅度可达9℃,而且会阻止热量进一步向深层传递;在冷却过程中,热管会加快路表冷却,同时使其周围温度保持较好的均匀度,有助于减小内部应力,提高路面稳定性.

**关键词:** 沥青混凝土;热管;数值模拟;边界条件;换热特性

**中图分类号:** TU528.4 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2012.06.029

## 0 引言

沥青混凝土路面对太阳热辐射的吸收能力极强,在高温下会变软,夏日阳光照射再加上行车重载的作用,将会使沥青混凝土路面的高温稳定性受到严峻考验.降低路面内部温度并加快热量转移是提高路面的高温稳定性的有效方法之一.热管作为具有高导热性能的传热元件,具有传热能力强、等温性高、可靠性高等独特优点,可用于道路融雪、低温地热利用等方面,在青藏铁路建设的冻土防护中得到广泛应用<sup>[1-4]</sup>.陈继等<sup>[5]</sup>对柴木铁路沼泽化冻土区热管冷却半径进行了观测研究,肯定了热管半径参数设计对冷却冻土路基及提高其稳定性的重要作用.郑广瑞等<sup>[6]</sup>对低温热管对地热的利用进行了试验及数值模拟研究,结果表明采用低温热管技术有效利用地热能,可以抑制土壤发生冻胀现象.在高速公路的高温稳定性方面,对热管应用的相关研究才初步开展,而在沥青路面中,由于其结构相对较薄,最近的热管应用研究多集中于横向布置的热管排.王家主等<sup>[7]</sup>对热管在沥青混凝土温度场调节中的作用进行了室内模拟,试验结果表明热管可以提高路面的热稳定性.

笔者选取沥青混凝土为模拟对象,建立了三

维模型,采用有限元方法对沥青混凝土在不同热边界条件下的换热特性进行了数值模拟,考虑了是否埋设热管的影响,获得了不同深度内温度随时间的发展变化规律,这有助于增强对热管应用范围拓展的理解,也为提高路面热稳定性的方案设计提供了新思路.

## 1 计算模型与数值模拟方法

如图1所示,建立了沥青混凝土的三维简化模型.沥青混凝土材料为砂石与改性沥青混合物,具有压紧的密实性结构.沥青混凝土的计算模型为正方形计算域,在 $x$ 、 $y$ 和 $z$ 方向均为300 mm,材料物性设定为各向同性.热管外壁壳体材料为铝合金,内部工作介质为液氨,外径为20 mm,长度为200 mm.在计算模型中将热管结构进行了简化处理,将铝合金外壳和液氮用均一物质进行替代,并对热传导系数、比热容等物性参数进行了当量处理.热管埋设于沥青混凝土上表面之下40 mm,其中150 mm的长度位于沥青混凝土中,而50 mm长度暴露于外界环境中.模型的具体几何尺寸与物性参数见表1.

利用Gambit对计算模型进行了网格划分.图2中给出了埋设热管的计算模型的网格图,在热管插入侧采用三角形网格,并在热管与路表间进

收稿日期:2012-06-14;修订日期:2012-08-25

基金项目:广东省交通运输厅科技项目(2009-02-028)

作者简介:彭振宇(1979-),男,湖南岳阳人,山西交通科学研究院工程师,主要从事公路与城市道路工程研究,E-mail: pengzhenyu123@163.com.

行了局部加密,然后采用平铺的方式在整个计算域生成五面体的体网格.在不埋设热管时,沥青混凝土计算模型的面网格为矩形网格,而体网格采用六面体网格.计算模型的边界条件为:上表面为等热流密度壁面,侧壁面与基层面为绝热壁面,热管与沥青混凝土接触的壁面为耦合壁面,热管外露壁面为等温壁面.对于埋设热管的计算模型,网格节点数约为47万,网格总数约为120万;而未埋设热管的计算模型约含19万网格节点,网格总数约为53万.利用Fluent对三维计算模型的换热特性进行了模拟计算.采用一阶隐格式非稳态传热方程,时间步长为0.5 s.采用两种热边界条件对三维模型进行瞬态传热计算,模型的初始温度设定为25℃.首先模拟路面的加热过程,上表面热流密度为500 W/m<sup>2</sup>,加热时间为120 min.再在该加热基础上模拟路面的放热过程,上表面热流密度为-100 W/m<sup>2</sup>,冷却时间也为120 min.在三维模型的不同深度共设定了5个监控点对温度进行记录,监控点位于模型中心,其距上表面距离分别为:5,10,25,55,90 mm.

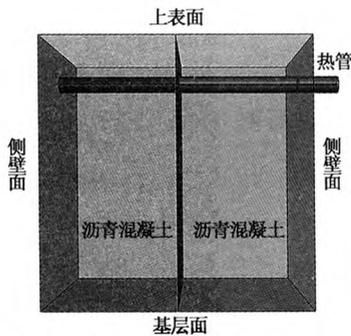


图1 埋设热管的沥青混凝土三维模型  
Fig.1 Three-dimensional model of the asphalt concrete with heat pipe

表1 模型的几何尺寸与物性参数

Tab.1 Size and material parameters of the model

物性参数	沥青混凝土	热管
几何尺寸/mm	300 × 300 × 300	$\frac{\pi}{4} \times 20^2 \times 200$
密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$2.33 \times 10^3$	$1.50 \times 10^3$
导热系数 $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1.28	500
比热容 $C_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	958	2200

## 2 计算结果分析

图3(a)和图3(b)中分别给出了未埋设热管和埋设热管两种模型中监控点温度随时间的变

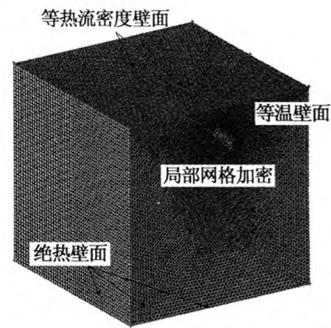


图2 三维模型网格划分与边界条件  
Fig.2 Mesh and boundary conditions of three-dimensional model with heat pipe

化规律.当沥青混凝土中未埋设热管时,监控点的温度都随着加热时间的增加而迅速升高,其中5 mm 监控点温度上升最为迅速,在30 min 内就上升至38℃左右,至加热结束的120 min,该点温度已经比初始温度升高了约27℃.10 mm 的监控点的升温趋势与5 mm 点非常相似,而且从30 min 之后,两者之间的温度差一直保持在2℃左右.25 mm 监控点的升温速率较为恒定,最终温度不超过45℃.55 mm 和90 mm 监控点温度变化规律与前三者具有较大区别,在加热初期,两者的温度变化很小,在30 min 内,55 mm 与90 mm 监控点的温度变化分别在2℃和1℃以内.至加热结束时,两点温度与初始温度相比各上升了约12℃和6℃.当沥青混凝土中埋设热管时,各监控点温度-时间响应曲线变化规律有了明显变化.5 mm 监控点的温度上升速率在12 min 之后有较明显减小,至加热结束时其温度比前者的最终温度低了近9℃.受热管影响,25 mm 监控点的升温速率大幅减小,其升温速率与未埋设热管时的90 mm 监控点相近.55 mm 监控点与90 mm 监控点的温度变化规律变得极为一致,两者的温度变化曲线几乎完全重合,最大温升仅为3℃左右.

图4(a)和图4(b)中分别给出了加热至120 min 时未埋设热管和埋设热管的沥青混凝土 y-z 中心截面的温度云图.在未埋设热管时,沥青混凝土内温度呈层状分布,由上表面至基层面,温度逐渐降低.其中高温区主要集中在20 mm 深度范围以内,温度范围为47~52℃.20~70 mm 深度范围为中间温度区,温度范围为35~46℃.70 mm 以下深度范围为低温区,温度不超过34℃,特别是140 mm 以下深度范围,温度几乎不受外部加热的影响.当沥青混凝土内埋设热管时,中间温度区在热管上方向上表面拱起,温度出现明显降低.在热管两侧,温度也相应降低.在热管下方,低温

区也明显向上方突起。

上述结果表明,当沥青混凝土上表面受到太阳辐射等外部加热作用时,浅层内温度会迅速升高,变化曲线呈现类抛物线规律,中层温度变化较为缓和,深层内的温度在初期并不受外部加热的影响,只有当浅、中层的温度上升梯度延伸到较深距离时才会发生变化;热管使等温线向其上方弯曲,使沥青混凝土浅、中层温度有明显降低,阻碍热量向其下方的深层传递。

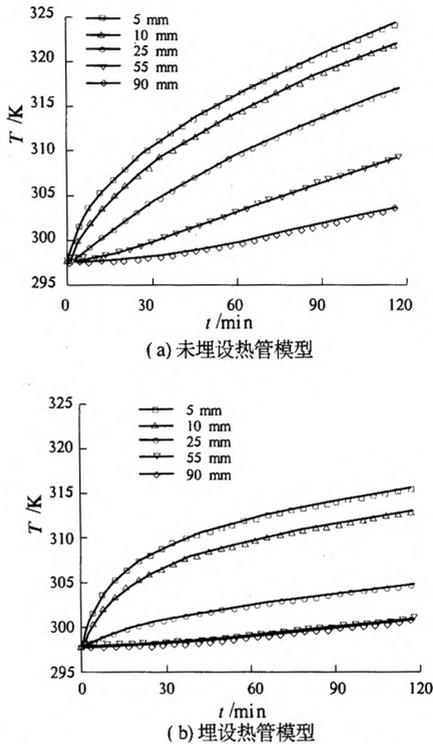


图 3 加热过程不同监控点温度 - 时间变化曲线  
Fig. 3 Temperature-time variation curve of different monitor points in heating process

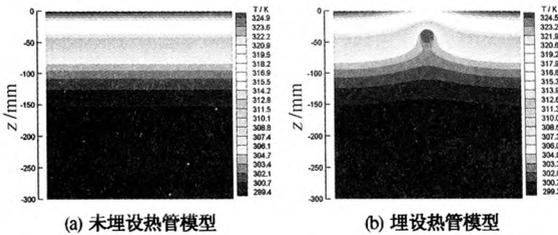


图 4 加热结束时  $y-z$  中心截面的温度云图  
Fig. 4 Temperature contour of  $y-z$  section of calculation model on the end of heating

图 5(a)和图 5(b)中分别给出了加热结束后冷却过程未埋设热管和埋设热管模型中监控点温度随时间的变化规律,冷却时间为 120 min. 在没有埋设热管的模型中,5 mm 和 10 mm 监控点的温度迅速降低,开始前者的降温速率高于后者,在

6 min 之后,两者的降温曲线基本重合,至冷却结束时两者温差在  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内. 25 mm 监控点温度在 6 min 之后开始出现明显降低. 55 mm 监控点的温度在前 18 min 内保持缓慢上升趋势,之后才出现缓慢的降温趋势. 90 mm 监控点的温度也呈现先上升后下降的趋势,其冷却终止时的温度仍高于冷却起始温度. 在冷却终止时,5 个监控点的温度都较为接近,平均保持在  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右. 对于埋设热管的模型,5 mm 和 10 mm 监控点与未埋设热管模型的相应点的温度变化规律非常相似. 25 mm 监控点一开始就呈现明显的降温趋势. 在开始冷却时,55 mm 和 90 mm 温度变化曲线仍保持重合状态,48 min 之后两者温度变化曲线开始有较明显的区别. 至冷却结束时,各监控点平均温度保持在  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,单个点间温度最大温差达到  $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,比未埋设热管模型的最大温差高  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右.

图 6(a)和图 6(b)中分别给出了冷却 120 min 时未埋设热管和埋设热管的沥青混凝土  $y-z$  中心截面的温度云图. 在未埋设热管的模型中,内部温度仍呈明显的层状分布,呈现出上下低、中间高的温度分布特点,整体温度差别保持在  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内. 对于埋设热管的模型,热管上方的等温线凹陷,下方等温线突起。

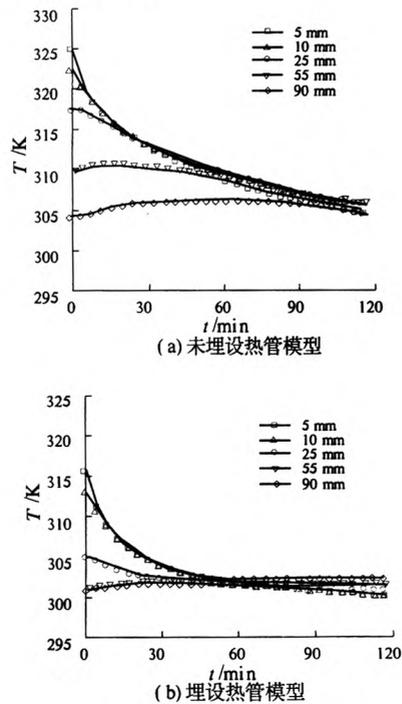


图 5 冷却过程不同监控点温度 - 时间变化曲线  
Fig. 5 Temperature-time variation curve of different monitor points in cooling process

上述结果表明,在紧随加热的冷却过程中,

浅层内温度会迅速降低,而在中层内部分热量仍继续向深层传递,温度开始并没有明显变化或甚至有小幅上升,之后才会降低,在深层内降温更为缓慢.热管会增加沥青混凝土上表面的降温速率,但会减小其下方的降温速率,能够提高当地的温度均匀性.

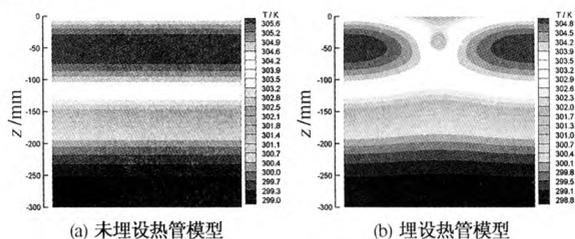


图6 冷却结束时  $y$ - $z$  中心截面的温度云图

Fig. 6 Temperature contour of  $y$ - $z$  section of calculation model on the end of cooling

### 3 结论

建立了简化的沥青混凝土三维计算模型,考虑未埋设和埋设热管两种情况,研究了在路表面受热和冷却不同过程中,沥青混凝土不同深度位置的温度变化规律,分析了其换热特性和热管的影响作用,主要结果包括:

(1) 沥青混凝土内部温度随上表面的加热时间的增加而升高,在浅层( $< 25$  mm)内,升温速率随时间的增加而逐渐减小,而在深层( $> 50$  mm)内,升温速率则呈现逐渐增大的趋势.

(2) 在冷却过程中,沥青混凝土浅层温度下降迅速,降温速率随时间的增加而逐渐减小,而在

深层内温度则呈现先上升后下降的趋势,甚至在本计算范围内直至冷却结束也未出现明显降低.

(3) 热管对沥青混凝土内部温度分布具有重要影响,在加热过程中,热管会显著降低路表面温度,同时阻碍热量进一步向深层传递,而在冷却过程中,热管将加速路面冷却,同时使其周围温度的均匀度提高.

### 参考文献:

- [1] COTE J, KONRAD J M. A numerical approach to evaluate the risk of differential surface icing on pavements with insulated Layers[J]. Cold Regions Science and Technology, 2005, 43:187 - 206.
- [2] 潘卫东, 赵肃菖, 徐伟泽, 等. 热棒技术加强高原冻土区路基热稳定性的应用研究[J]. 冰川冻土, 2003, 25(4):433 - 438.
- [3] 李宁, 魏庆朝, 葛建军. 青藏铁路热棒路基结构形式及工作状态分析[J]. 北京交通大学学报, 2006, 30(4):22 - 25.
- [4] 纪小平, 郑南翔, 李欣. 层间接触条件对沥青路面高温性能的影响研究[J]. 郑州大学学报:工学版, 2010, 31(2):31 - 34.
- [5] 陈继, 徐舜华, 窦顺, 等. 柴木铁路沼泽化冻土区热管冷却半径的观测研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(4):897 - 901.
- [6] 郑广瑞, 杨峻. 低温热管地热利用试验及数值模拟[J]. 可再生能源, 2011, 29(3):104 - 107.
- [7] 王家主. 热管对沥青混凝土温度场调节的室内模拟[J]. 公路, 2011(4):105 - 108.

## Influence of Heat Pipe on Heat Transfer Characteristics of Asphalt Concrete under Different Thermal Boundary Conditions

Peng Zhen-yu

(Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** The temperature of asphalt pavement rises rapidly in the strong sunlight. It will cause troubles to the thermal stability of the pavement. Heat pipe is a kind of ideal apparatus to transfer heat and maintain uniform temperature distribution, and it will effectively reduce the rising speed of asphalt pavement temperature. Three-dimensional models of asphalt concrete are established based on numerical simulation method, and conditions of with and without heat pipe are considered. The temperature to time response characteristics at different depths of the concrete are studied, when the surface of the concrete is conducted in heating or cooling. The calculation results show that, the temperature of concrete surface is reduced distinctly by the heat pipe in the heating process. The maximal temperature decrease is  $9^{\circ}\text{C}$ . Counteracted by the heat pipe, heat is difficult to be conducted to deep region beneath the heat pipe. The cooling speed of concrete surface is accelerated by heat pipe in the cooling process, and the temperature distribution around heat pipe is more uniform than that of other regions. It is helpful to reduce internal stress and maintain structure stability for the pavement.

**Key words:** asphalt concrete; heat pipe; numerical simulation; boundary condition; heat transfer characteristics