

DOI: 10.11779/CJGE201605004

# 寒区路基遮阳的热流平衡模型及其应用

谭康豪<sup>1, 2</sup>, 覃英宏<sup>1, 2</sup>

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西大学工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004)

**摘 要:** 在路肩上铺设遮阳板是冷却多年冻土路基的一种重要工程措施, 遮阳板上下表面及路肩的热流量控制其降温效果, 但现有的研究大多分析实地遮阳板的降温效果以及遮阳板的设计参数。基于能量平衡原理, 构建遮阳板与路肩的热流平衡理论模型并利用实测数据验证模型的准确性。经过对模型参数敏感性分析发现: 减小遮阳板下表面热辐射系数可以有效地降低遮阳板到路肩表面的长波辐射量, 从而降低路面温度。而增大遮阳板下表面的风速对减少路肩热吸收量的贡献很小。因此, 减小板下表面的热辐射系数同时将遮阳板尽可能安设在接近路基表面的位置, 此举既可以有效冷却路基又可以尽量避免遮阳板遭受风力破坏, 有利于一步推广遮阳板的使用。

**关键词:** 寒区路基; 遮阳板; 多年冻土; 热辐射系数; 净长波辐射

中图分类号: TU459.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)05-0798-06

**作者简介:** 谭康豪(1990-), 男, 助理工程师, 主要从事寒区道路工程、新能源开发等研究工作, E-mail: haokangtan@163.com。

## Thermal balance of shading boards over cold-region roadbed: Modeling and application

TAN Kang-hao<sup>1, 2</sup>, QIN Ying-hong<sup>1, 2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. MOE Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** One of cold-region roadbed cooling techniques is to install shading boards on the shoulder of the embankment over permafrost stratum. Most researches currently focus mainly on the temperature evolution of the roadbed under the board and on the optimal design of the board. The cooling mechanism of the board, however, is not available. The heat flux balance between the board and the shoulder is simulated, and the model is validated using the measured data from an in-situ shading board. The results show that the cooling effects of the board can be greatly promoted by decreasing the thermal emissivity of the lower surface of the board, and/ or can be possibly enhanced by increasing the albedo of the upper surface of the board. Increasing the wind under the board, however, may contribute negligibly to the cooling effects. This means that installing the board as closely as to the shoulder surface and decreasing the thermal emissivity of the lower surface of the board can both promote the cooling effects and prevent the board from wind damage simultaneously.

**Key words:** cold-region roadbed; shading board; permafrost stratum; thermal emissivity; long-wave emission

## 0 引 言

青藏铁路穿越 550 km 多年冻土, 221 km 高含冰量冻土段, 其中约 50% 为高温高含冰量冻土段<sup>[1]</sup>。为保护铁路下层冻土的长期稳定性, 青藏铁路多年冻土区的路基构建采用主动冷却冻土的方式, 具体措施主要包括通风管、热棒、块碎石路基、遮阳板路基等<sup>[2-8]</sup>。

目前, 遮阳板的降温效果已经得到广泛研究<sup>[9-10]</sup>。遮阳板的室内模型试验研究和实地遮阳板温度观测结果表明: 路堤向阳路肩的地温比无遮阳板的对比路堤同样位置的地温低 3℃~5℃。具体的降温效果不仅与路基尺寸、走向、局地气象因素有关, 还与遮阳板的

设计和材料有关。鉴于路基尺寸、走向、局地气象为不可控因素, 合理利用遮阳板尺寸、材料可有效提升遮阳板的冷却效果。石磊等<sup>[11]</sup>对遮阳板在不同高度、支撑角钢的不同间距和不同型号角钢等结构参数进行了数值模拟分析; 冯文杰等<sup>[12]</sup>通过对不同净空遮阳板的下表面风速进行模拟计算, 分析了遮阳板高度与风速的变化关系。这些研究表明, 改变板尺寸与设计能在一定程度上增强降温效果。然而, 控制遮阳板降温

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金项目 (2014 (1685))

收稿日期: 2015-04-16

效果的关键在于遮阳板与路肩之间的热流量, 只有从遮阳板能量热流平衡角度去揭示其降温机理, 才能找到最佳的遮阳板尺寸、材料, 以便最大程度上发挥遮阳板的降温效果, 从而推广遮阳板的使用。目前, 缺乏有关遮阳板能量热流平衡方式、板表面热物理参数对遮阳板的降温效果之类的研究。

本文从热力学出发, 建立寒区路基遮阳板的热平衡理论计算模型, 构建遮阳板与路肩的热流平衡理论模型并利用实测数据验证模型的准确性。运用模型研究改变遮阳板下表面的热辐射系数、上表面的反射率对遮阳板降温效果的影响, 并列举出遮阳板热辐射系数、反射率的相应工艺, 为优化遮阳板的降温效果提供理论指导。

## 1 遮阳板热流平衡模型的建立

白天, 遮阳板上下表面的热流主要受太阳辐射的影响, 在太阳辐射  $I(\text{W}/\text{m}^2)$  作用下, 一部分辐射被反射, 其余的太阳辐射被遮阳板吸收。热吸收量分为热传导  $G(\text{W}/\text{m}^2)$ 、热对流  $H(\text{W}/\text{m}^2)$ 、净长波辐射  $L(\text{W}/\text{m}^2)$  和蒸发  $E(\text{W}/\text{m}^2)$ 。遮阳板表面一般不存在水分蒸发,  $E$  可忽略不计, 那么遮阳板上表面的热流平衡为

$$\begin{cases} I(1-\rho) = G_u + H_u + L_u & (\text{白天}) \\ 0 = G_u + H_u + L_u & (\text{夜晚}) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $I(\text{W}/\text{m}^2)$  为瞬时太阳净辐射;  $\rho$  为遮阳板上表面的反射率; 下标  $u$  代表遮阳板上表面。

假设路肩和遮阳板的间距足够小, 路肩到天空的视角因子为零, 则遮阳板的下表面的热流平衡为

$$0 = G_l + H_l + L_l \quad (\text{白天、夜晚}), \quad (2)$$

式中, 下标  $l$  代表遮阳板的下表面。

相对于路肩土层、遮阳板一般较薄, 其热存储量可忽略不计, 即  $G=0$ , 传入遮阳板的热量等于传出的热量, 如图 1 所示, 遮阳板的热流平衡为

$$I(1-\rho) = H_u + H_l + L_l \quad (\text{白天}), \quad (3a)$$

$$0 = H_u + H_l + L_l \quad (\text{夜晚}). \quad (3b)$$

## 2 遮阳板热流平衡模型的验证

验证遮阳板热流平衡式(3)需要分析计算板上下表面的瞬时太阳辐射量  $I$ 、反射率  $\rho$ 、对流量  $H$ 、长波辐射  $L$ 。由于遮阳板任意时刻的热流平衡都遵循式(3), 运用夜晚的气象数据验证式(3)相对简单且不需要考虑太阳辐射量  $I$  和反射率  $\rho$  等不确定性因素。因此, 本文拟用夜晚的气象数据验证式(3b)。以离开板面的热流为负, 到达板面的热流为正, 式(3b)中的对流量  $H_u$  和  $H_l$  的计算式为<sup>[13-14]</sup>:

$$H_u = h_c(T_{au} - T_{su}), \quad (4)$$

$$H_l = h_c(T_{al} - T_{sl}). \quad (5)$$

式中  $T_{su}$  为板上表面温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_{au}$  为板上表面气温 ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{sl}$  为板下表面温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_{al}$  为板下表面气温 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $h_c$  为对流换热系数 ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ), 表达式为<sup>[13]</sup>

$$h_c = \begin{cases} 5.6 + 4.0v & v < 5 \\ 7.2 \times v^{0.78} & v \geq 5 \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $v$  为风速 ( $\text{m}/\text{s}$ )。

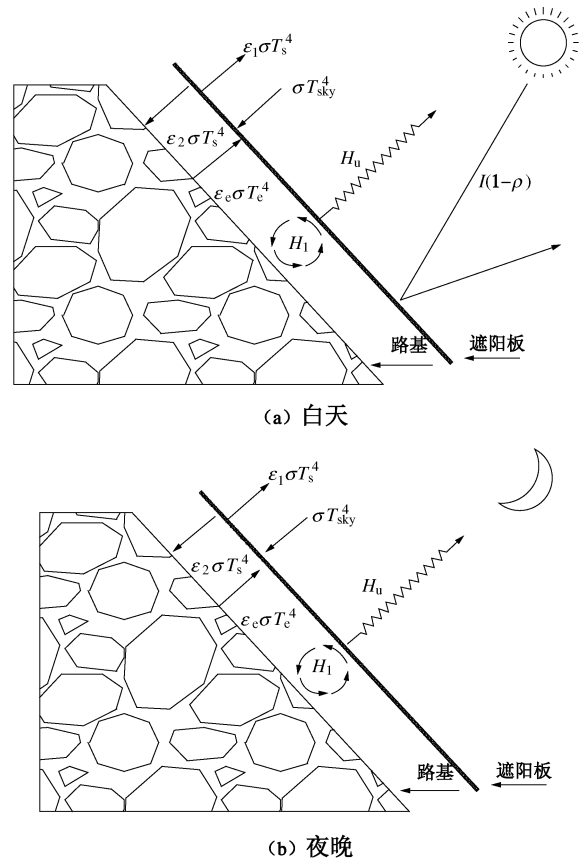


图 1 遮阳板热流平衡模型(a) 白天(b)夜晚

Fig. 1 Heat model of shading board (a) daytime (b) night

$L$  为净长波辐射产生的热量, 其大小取决于遮阳板表面温度、表面热辐射系数  $\varepsilon(\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 、从其它表面到达板表面的长波辐射量。假设遮阳板上表面热辐射系数为  $\varepsilon_1$ , 下表面热辐射系数为  $\varepsilon_2$ , 路肩表面热辐射系数为  $\varepsilon_c$ , 同时假设板和路肩表面的距离足够近以使路肩到天空的视角因子为 0, 则式(3)中的  $L_u$  和  $L_l$  为<sup>[13-14]</sup>

$$L_u = -\varepsilon_1 \sigma T_s^4 + \sigma T_{sky}^4, \quad (7)$$

$$L_l = -\varepsilon_2 \sigma T_s^4 + \sigma \varepsilon_c T_c^4. \quad (8)$$

式中  $\sigma$  为史蒂芬-波尔兹曼常数, 约为  $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$ ; 温度  $T$  (不同下标) 的单位为  $\text{K}$ ;  $T_{sky}$  为天空温度<sup>[13-14]</sup>:

$$T_{sky} = \varepsilon_{sky}^{0.25} (T_{au} + 273.15), \quad (9)$$

式中,  $\varepsilon_{\text{sky}}$  为天空辐射系数:

$$\varepsilon_{\text{sky}} = 0.754 + 0.0044b_0\gamma/(a_0 - \gamma) \quad (10)$$

式中,  $a_0=17.3$ ,  $b_0=237.7$ ,  $\gamma=a_0T_{\text{au}}/(b_0+T_{\text{au}})+\ln(\text{RH}/100)$ ,  $\text{RH}$  为相对湿度, ( $T_{\text{au}}$  单位为  $^{\circ}\text{C}$ )。将式 (4) ~ (6) 代入式 (3) 有

$$-\varepsilon_1\sigma T_{\text{su}}^4 - \varepsilon_2\sigma T_{\text{sl}}^4 + \sigma T_{\text{sky}}^4 + \varepsilon_e\sigma T_e^4 + h_{\text{cu}}(T_{\text{au}} - T_{\text{su}}) + h_{\text{cl}}(T_{\text{al}} - T_{\text{sl}}) = 0 \quad (11)$$

冯文杰等<sup>[14]</sup>在试验场地位于青藏高原可可西里与风火山之间, 北麓河盆地南部青藏公路西侧现场实测遮阳板路基 2010-07-24—2010-11-24 的温度, 如图 2 所示。图 2 可以为验证模型正确与否提供板上表面温度  $T_{\text{su}}$ 、板上表面气温  $T_{\text{au}}$ 、板下表面气温  $T_{\text{al}}$  以及路肩表面温度  $T_e$  等参考数据。由于板的厚度很小, 可假定  $T_{\text{su}}=T_{\text{sl}}$ 。此外, 仍然需要板上下表面的风速, 才能计算遮阳板的热流量。青藏高原的平均风速约为 4.0 m/s, 因此假定板上表面的风速为 4.0 m/s。依 Feng 等<sup>[15]</sup>的计算模型, 当板上表面风速为 4.0 m/s 时, 板下表面的风速为 2 m/s 左右。为简化计算, 假设  $\text{RH}=60\%$ 。

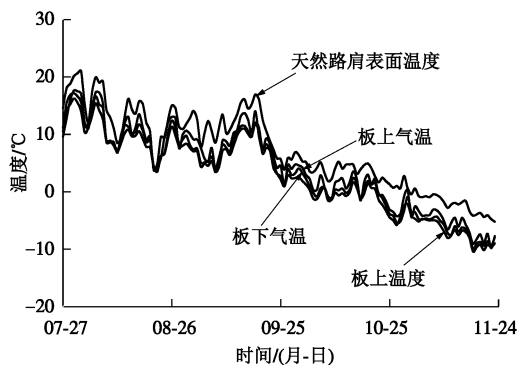


图 2 北麓河地区实测数据

Fig. 2 Measured data of Beiluhe area

验证式 (14) 所需要的参数还包括板上表面热辐射系数  $\varepsilon_1$ 、板下表面热辐射系数  $\varepsilon_2$  以及路肩表面热辐射系数  $\varepsilon_e$ 。由于遮阳板为普通建材, 取  $\varepsilon_1=\varepsilon_2=0.85$ 。路肩表面为土体, 相对于遮阳板, 土体表面粗糙, 本文取  $\varepsilon_e=0.90$ 。

将材料的  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_e$  等参数和相关气象参数  $T_{\text{au}}$ ,  $T_{\text{al}}$ ,  $T_{\text{su}}$ ,  $T_{\text{sl}}$ ,  $T_e$ ,  $T_{\text{sky}}$  代入式 (11) 的左边, 理论上式 (11) 的两边相等; 但由于测量误差与气象参数、材料的参数的不确定性, 式 (11) 的左边不一定等于零, 而是在零值的上下波动, 但是波动的大小并不能说明模型的准确性。为了直观验证模型的准确性, 可设定  $T_{\text{au}}$ ,  $T_{\text{al}}$ ,  $T_{\text{su}}$ ,  $T_{\text{sl}}$ ,  $T_e$  中的任何一个参数未知, 然后依式 (11) 求解该参数, 如果所求取的参数与实测参数一致, 则说明模型验证准确。在式 (11) 中,  $T_{\text{au}}$ ,  $T_{\text{al}}$ ,  $T_{\text{su}}$ ,  $T_{\text{sl}}$  都为非线性, 而  $T_e$  为线性, 同时考

虑到  $T_e$  为冷却路基的关键温度, 因此本文求取  $T_e$  并将其与实际值比较。其具体方法是将材料的  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_e$  等参数和相关气象参数 (除  $T_e$  外) 代入式 (11) 左边, 并令等式右边等于零, 然后求取  $T_e$ 。

图 3 为路基温度计算值与实测值的对比曲线, 依式 (14) 计算得到模拟值/实测值的标准差为 0.696, 变异系数为 0.657, 相关系数为 0.713, 两条曲线的拟合程度较好。虽存在些波动, 可能是由于遮阳板的热辐射率和当地气象因素的不确定性所致, 也有可能是遮阳板上下两侧风速的不确定性。由图 3 可见, 进入 9 月份后, 模型后期的计算值  $T_e$  与实测的  $T_e$  出现较大的波动。原因可能是青藏高原秋冬季风速要比夏季大, 外界风速的变化也会导致遮阳板下表面的风速发生相应的变化, 但板上下两侧的风速变化并非比例变化<sup>[7]</sup>。尽管存在这些不确定性因素, 但计算值与实测值的误差在允许范围内, 因此认为所建的模型是正确的。

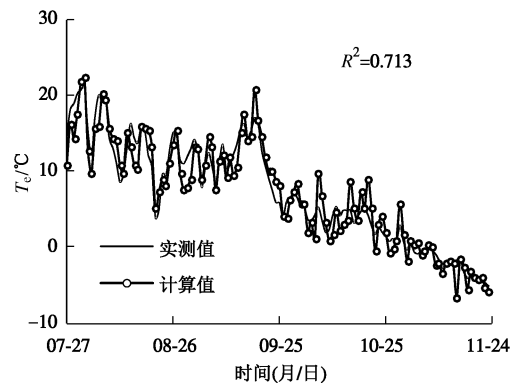


图 3 路基温度计算值与实测值的对比曲线

Fig. 3 Contrast curve of calculated temperatures and measured values of roadbed

### 3 模型的应用

#### 3.1 增强遮阳板降温效果的途径

式 (11) 在理论上揭示了遮阳板与路肩的热流平衡规律, 即气象因素、遮阳板材料因素影响路肩表面的温度。依式 (11), 可以得到路肩表面的热流平衡模型:

$$\varepsilon_2\sigma T_{\text{sl}}^4 - \varepsilon_e\sigma T_e^4 + h_{\text{cl}}(T_{\text{al}} - T_{\text{sl}}) = G \quad (12)$$

式 (12) 表示路肩表面所吸收的热流全部转化为路肩的热存储  $G$ 。冷却路基即  $G<0$ , 并使  $G$  的绝对值增大。依式 (12), 可以通过两种方法增大路基的热散失。

(1) 改变对流量。由于遮阳板下表面的气温与遮阳板的温度相差不大, 即  $h_{\text{cl}}(T_{\text{al}}-T_{\text{sl}})$  趋向于零, 降低对流量对增大路基的热散失可能贡献很小。

(2) 减少路肩的净长波辐射产生的热流。依式

(12), 增大  $T_e$  可增大路肩向外辐射的热流, 但增大  $T_e$  与冷却路基目的相悖。可调控的方式包括降低  $\varepsilon_2$ ,  $T_{sl}$  以及增大  $\varepsilon_e$ 。由于大部分路基表面为土体或是块碎石, 其表面热辐射系数一般为  $0.85 \sim 0.90$ , 可提高的幅度很小。因此, 行之有效的办法是降低遮阳板下表面的热辐射系数和板下表面温度。

表 1 不同工程措施的降温效果对比

Table 1 Comparison of cooling effects of different engineering measures								
温度	遮阳板 <sup>[14]</sup>		通风管 <sup>[16]</sup>		热棒 <sup>[2]</sup>		碎/块石	
	(阳坡)		(下 0.5 m)		(下 3.2 m)		护坡 <sup>[2]</sup>	
	最低	最高	最低	最高	最低	最高	最低	最高
$(t_2-t_1)/^{\circ}\text{C}$	3.0	5.0	1.0	2.0	0.8	1.06	0.8	2.5
平均值/ $^{\circ}\text{C}$	4.0		1.5		0.9		1.7	

注:  $t_1$  为采取降温措施的路基温度;  $t_2$  为采取普通的路基温度。

表 1 对比不同工程措施的降温效果, 从表中可以看出, 在实际工程中, 遮阳板的降温效果是非常明显的, 平均降温可达  $4.0^{\circ}\text{C}$ , 较其它主动保护冻土措施的效果来得更为快捷。目前, 应用于工程实践中的遮阳板上下表面均为单一材料, 其表面的热辐射系数在  $0.85$  左右, 如图 4 所示, 当材料  $\varepsilon_1=\varepsilon_2=0.85$  时, 在高温季节, 利用式 (11) 遮阳板路肩表面温度比天然路肩表面温度要低  $5^{\circ}\text{C} \sim 8^{\circ}\text{C}$ 。进入秋冬季节, 太阳辐射逐渐减弱, 遮阳板阻隔太阳辐射的优势也随之降低, 体现在板内外地表温度差别逐渐减小。进入冬季, 二者几乎处于同一温度, 模拟结果与实际工程的遮阳板降温幅值吻合较好。但遮阳板的降温效果将达到什么程度, 能否继续挖掘其降温潜能并最大程度发挥是笔者所期盼的。

因此, 本文利用图 2 中的气象数据, 当材料其它参数不变时, 分别取遮阳板下表面的热辐射系数  $\varepsilon_2=0.30, 0.60, 0.85, 0.90$ , 模拟遮阳板向路肩的长波净辐射量。如图 5 (a) 所示, 降低  $\varepsilon_2$  可以有效地减少路肩接收到的长波辐射的热量。利用相应的热流量和式 (12), 并令  $G=0$ , 则路肩表面的温度如图 5 (b) 所示, 随着  $\varepsilon_2$  的降低, 路基温度也在降低。当  $\varepsilon_2$  很小时, 路基的温度降低的很明显, 甚至达到零下几十度, 但这在现实中很难达到。原因在于路基表面和土体本身并非完全绝热 (即  $G \neq 0$ ), 当路基表面温度下降时, 路肩将从周围土体吸热从而阻止路基表面温度的持续下降。具体的降温效果可能取决于路基的尺寸、材料和施工等因素, 须现场试验做进一步研究。

另一个可行的办法是增大遮阳板上表面的反射率, 如式 (3a) 所示, 增大反射率  $\rho$  可降低  $G_0$ , 从而降低遮阳板下表面的温度  $T_{sl}$ , 也就是遮阳板向路肩表

面辐射的热流量。由于没有遮阳板反射率和太阳辐射的相关数据, 故无法运用模型式 (3a) 模拟研究遮阳板上表面反射率对路基降温效果的影响, 有待进一步试验研究。

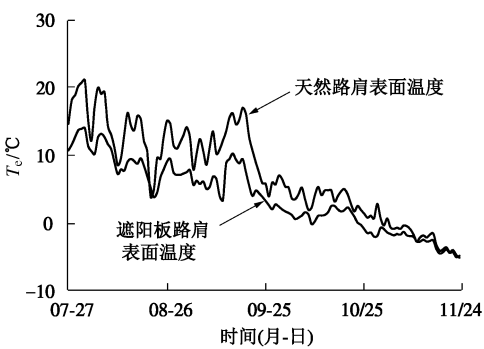


图 4 地表温度对比曲线

Fig. 4 Comparison of ground temperatures inside and outside a shading board

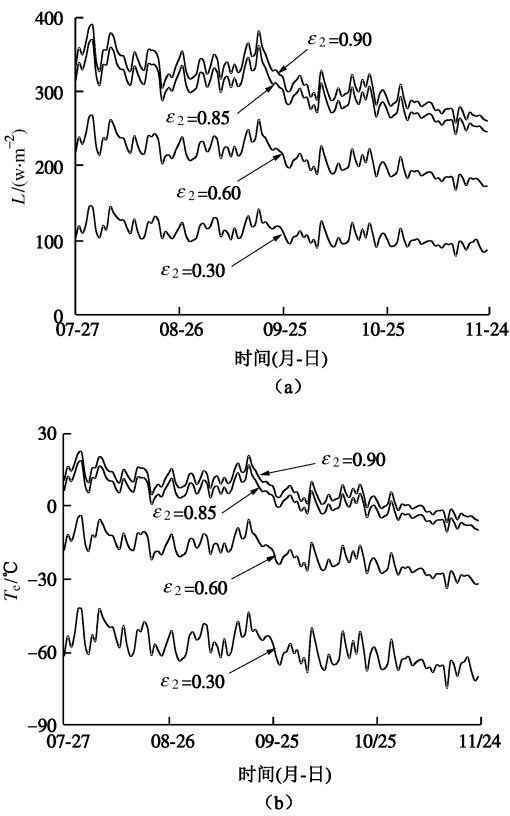


图 5 热辐射率对净长波辐射和路基温度的影响

Fig. 5 Effect of thermal emissivity on net long-wave radiation and temperature of roadbed

在遮阳板下表面贴薄层低热辐射率材料或喷涂材料以降低遮阳板下表面的热辐射率。因为遮阳板下表面未直接受到太阳辐射, 薄层低热辐射率材料或喷涂材料可在较长时间内保持较低辐射率。有些建材具有低热辐射率, 如表 2 所示。

3.2 遮阳板热流平衡模型的工程意义

遮阳板主要应用于青藏高原地区，由于青藏高原风力大，遮阳板易受损，故日后维修成本较高。从本文建立的模型（式（11））可以得到启发：由于遮阳板下表面的气温和路肩表面的温度相差较小，对流引起的热散失很少，路肩散热主要依赖于长波辐射。因此，在实际工程中，尽可能地把遮阳板安置在接近路基表面的位置（但不可以紧贴路基表面，否则路肩遮阳板的热流方式主要以热传导为主而不是以长波辐射为主），通过降低板下表面的长波辐射系数以达到冷却路基的目的。此举可很好地避免遮阳板因风力过大而引起损坏，提高遮阳板的工程耐用性。

表 2 不同材料的热辐射率

Table 2 Typical thermal emissivities of construction materials			
普通建筑 材料	抛光铝、 不锈钢	铸铁、 水泥板	混凝土、 石头
$\varepsilon$	<0.3	0.3~0.7	>0.7

4 结 论

本文提出了寒区路基遮阳板的热流平衡理论计算模型，对比分析路基温度实测值和理论计算值，验证模型的准确性，分析遮阳板的热流平衡得到如下两点结论。

（1）减小遮阳板下表面的热辐射率可以有效地降低到达路肩表面的长波辐射，增强遮阳板的冷却效果，增大遮阳板上表面的反射率也可能提高路基的降温效果，具体降温效果需要进一步试验验证。

（2）遮阳板下表面风速对遮阳板的冷却效果的贡献很小，实际工程中可以将遮阳板紧贴路肩表面的位置，避免遮阳板由风力过大而引起损坏，降低其维护成本。

参考文献：

[1] 冯文杰, 马 巍. 青藏铁路遮阳板措施应用效果观测研究[J]. 冰川冻土, 2006, **28**(1): 108 - 115. (FENG Wen-jie, MA Wei. An experimental study of the effect of awning along the Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, **28**(1): 108 - 115. (in Chinese))

[2] 程国栋, 孙志忠, 牛富俊. “冷却路基”方法在青藏铁路上的应用[J]. 冰川冻土, 2006, **28**(6): 797 - 808. (CHENG Guo-dong, SUN Zhi-zhong, NIU Fu-jun. Application of roadbed cooling methods in the Qinghai-Tibet Railway construction[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, **28**(6): 797 - 808. (in Chinese))

[3] 胡明鉴, 汪 稔, 孔令伟. 青藏铁路透壁通风管通风路基模型试验及初始温度场特征[J]. 冰川冻土, 2004, **26**(5): 582 - 586. (HU Ming-jian, WANG Ren, KONG Ling-wei. Simulated experiment of the embankment with perforated ventilation pipes and the features of its initial temperature field of the Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, **26**(5): 582 - 586. (in Chinese))

[4] LAI Y M, WANG Q S, NIU F J. Three dimensional nonlinear analysis for temperature characteristic of ventilated embankment in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, **38**: 165 - 184.

[5] 赖远明, 张鲁新, 徐伟泽, 等. 青藏铁路抛石路基的温度特性研究[J]. 冰川冻土, 2003, **25**(3): 291 - 296. (LAI Yuan-ming, ZHANG Lu-xin, XU Wei-ze, et al. Temperature features of broken rock mass embankment in the Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, **25**(3): 291 - 296. (in Chinese))

[6] 喻文兵, 赖远明, 张学富, 等. 块石层与碎石层降温效果室内试验研究[J]. 冰川冻土, 2003, **25**(6): 638 - 643. (YU Wen-bing, LAI Yuan-ming, ZHANG Xue-fu, et al. Experimental study on the cooling effect of block stone and crushed stone[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, **25**(6): 638 - 643. (in Chinese))

[7] 王爱国, 马 巍, 吴志坚. 块石路堤上覆砂砾石厚度对冻土路基冷却效果的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2005. **24**(13): 2333 - 2341. (WANG Ai-guo, MA Wei, WU Zhi-jian. Study on influence of sand and gravel layer thickness up block-stone railway embankment on cooling effect of frozen-soil foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(13): 2333 - 2341. (in Chinese))

[8] MIKHAILOV G P. Temperature regime of embankment consisting of coarse rock on permafrost[J]. Transportation Construction, 1971, **12**: 32 - 33. (in Russian)

[9] 冯文杰. 抛石及遮阳棚技术在多年冻土地区路基中的应用研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2002. (FENG Wen-jie. An application study of the riprap and awning on the roadbed engineering in Qinghai-Tibet Plateau permafrost regions[D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute Chinese Academy of Science, 2002. (in Chinese))

[10] 俞祁浩. 冻土路基地温传热过程及调控新技术研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2006. (YU Qi-hao. Study on the heat conduction process of roadbed in

- permafrost region and new control methods[D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute Chinese Academy of Science, 2006. (in Chinese))
- [11] 石磊, 李宁, 李国玉, 等. 多年冻土区路堤边坡上遮阳板的稳定性分析[J]. 冰川冻土, 2007, **29**(6): 986 - 991. (SHI Lei, LI Ning, LI Guo-yu, et al. Stability analysis of the awning in road engineering in permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, **29**(6): 986 - 991. (in Chinese))
- [12] 冯文杰, 马巍, 牛永红路基边坡遮阳板下风速变化模拟计算探讨[J]. 冰川冻土, 2009, **31**(1): 106 - 112. (FENG Wen-jie, MA Wei, NIU Yong-hong. Simulative analysis of the wind speed variation under the awning of an embankment side slope[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, **31**(1): 106 - 112. (in Chinese))
- [13] QIN Y H, JACOB E H. Understanding pavement surface energy balance and its implications on cool pavement development[J]. Energy and Buildings, 2014, **85**: 389 - 399.
- [14] 冯文杰, 孙志忠, 李国玉, 等. 青藏高原路堤边坡遮阳措施辐射影响分析[J]. 冰川冻土, 2011, **28**(6): 797 - 808. (FENG Wen-jie, SUN Zhi-zhong, LI Guo-yu, et al. Radiation effect of shading board on embankment side slope on Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, **28**(6): 797 - 808. (in Chinese))
- [15] FENG W, KOMLE N I, et al. Numerical analysis of wind speed variation under awning boards covering embankment side slopes[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, **68**(3): 162 - 172.
- [16] 牛富俊, 马巍, 赖远明. 青藏铁路北麓河试验段通风管路基工程效果初步分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(2): 2652 - 2658. (NIU Fu-jun, MA Wei, LAI Yuang-ming. Preliminary analysis on engineering effect of ventilation embankment at Beiluhe testing section of Qinghai-Tibet Railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(2): 2652 - 2658. (in Chinese))

## 第十四届全国地基处理学术讨论会（第1号通知）

为加强地基处理技术的学术交流, 提供新理论、新技术、新理念、新设备的探讨平台, 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会地基处理学术委员会将于2016年11月中旬在江西省南昌市举办第十四届全国地基处理学术研讨会, 会议旨在展示地基处理领域的最新研究成果和发展趋势。

**会议征文内容:** ①现有地基处理技术进展; ②地基处理新技术的开发和应用; ③复合地基理论与实践新发展; ④地基处理工程勘察技术、设计计算、施工设备、质量检测等方面的新发展; ⑤地基处理其它方面的新发展。

**论文格式要求:** ①应征论文要求内容具体、明确、严谨、未公开发表过、文责自负且不涉及保密内容。论文字数一般不超过8000字(包括图标和公式)。具有创新性以及充分尊重事实的论文将被优先采纳。②论文格式请按《岩土工程学报》论文体例。③请务必注明作者详细通讯地址、邮编、联系电话及

E-mail地址。④提交电子稿审稿, 确认录用后再提交版权转让声明的扫描件。

**论文集:** 会议论文集将收录大会主题报告及所有被学术委员会录用的论文, 并正式出版。

**地址:** 江西省赣州市红旗大道86号江西理工大学建筑与测绘工程学院(341000); 或江西省南昌市经济技术开发区双港东大街808号华东交通大学土木建筑学院(330013)。

**投稿邮箱:** cgis2016@163.com。详情见网站: <http://jc.jxust.edu.cn/jcweb>。

**重要时间:** 提交全文截止日期2016年7月15日; 全文录用截止日期2016年8月5日; 修改稿提交截止日期2016年8月15日, 会议时间2016年11月18日~20日。

**论文投稿及其他事宜请联系:** 邓通发, 13970783208; 胡文韬, 18679135796; 龚良勇, 13870607175。

(大会组委会 供稿)