

太阳光反射涂层对水泥路面温度特性及城市环境影响

杨飞¹, 陈家豪^{2*}

(1. 河南建筑职业技术学院, 河南 郑州 450064; 2. 河南工业大学 土木建筑学院, 河南 郑州 450001)

摘要:水泥混凝土路面温度过高是导致路面病害的重要原因之一,也是加剧热岛效应的重要因素。为降低夏季高温水泥路面温度及温度梯度,减缓城市热岛效应,该文制备以氟硅改性丙烯酸为基料的反射涂层,开展试验研究,实测使用涂层前后路面温度及温度梯度。开展理论分析,计算反射涂层对路面翘曲变形的影响,分析涂层对路面放热的影响,探讨涂层对城市热岛效应的影响。结果表明:夏季高温天气下路面最高温度为 59℃,最大正温度梯度为 96.1℃/m,反射涂层能够有效降低水泥混凝土路面温度约 9℃,降低最大正温度梯度为 31.7℃/m;应用反射涂层前,路面最大翘曲应力达 2.16 MPa,应用反射涂层后最大翘曲应力为 1.7 MPa,降低约 30%;使用反射涂层能有效减少水泥路面向空气散发的热量约 15%,一定程度上能缓解夏季热岛效应。

关键词:水泥混凝土路面;反射涂层;温度;翘曲应力;热岛效应

中图分类号: U416.216

文献标志码: A

随着城镇化的推进,城市规模的扩大,热岛效应也越来越严重^[1]。道路占城市总面积的 20%~30%,且其中主要是不透水的沥青路面和水泥路面^[2-5]。相比于植被覆盖区域,城市路面具有较强的太阳光吸收能力和储热能力,且阻碍渗透散热,隔绝土壤与大气热湿交换,是热岛效应的重要诱因。热岛效应除了加大夏季空调电能消耗外^[6],也会使粉尘、颗粒物及有毒气体等在空气热对流作用下悬浮在空中,大大加重空气污染程度,损坏人民身体健康^[7]。因此,如何缓解城市热岛效应是迫切需要解决的难题。

太阳光反射涂层能有效减少结构吸收的热量,是缓解热岛效应、降低路面温度、减少路面热病害的重要手段之一^[8-9]。反射涂层在沥青路面上的应用已有一些研究。2008 年开始就有学者关注到了反射涂层在公路上的应用,徐永丽等^[10]报道了以改善城市和公路沿线环境的反射性沥青路面研究进展;张静^[11]在其学位论文中制备了硅丙乳液为基料,空心微珠为功能填料的反射涂层,并进行了降温试验;冯德成等^[12]开发了水溶型反射涂层,并在道路上进行了试验,结果表明能降低沥青路面温度约 11.4℃;郑木莲等^[13]以环氧树脂为基料制备了路面反射涂层,测试了其降温效果,并研究了反射率的测试方法,具有一定借鉴意义;程

承^[14]分析了反射涂层在沥青路面的应用,结果表明,使用涂层后能有效降低沥青路面向大气传输的热量,对于缓解城市热岛效应有一定作用,而且能有效减缓路面车辙;孙威^[15]研究了水性环氧树脂反射涂层的制备,分析了颜料浓度等对反射涂层效果的影响;唐伯明等^[16]分析了沥青路面反射涂层的老化规律,分析了老化过程涂料外形、反射率等变化情况,结果表明太阳辐射是导致涂层老化的重要因素。从上述文献可以看出,沥青路面反射涂层研究从机理、涂层制备到老化等研究已经较为完善,可以为水泥路面反射涂层研究提供参考。

相比于沥青路面,水泥路面以其较高的承载力、较好的耐久性、较长的寿命及不易出现车辙等优点在城市中应用,是城市路面的重要组成部分,尤其是一些交通量级轻的次级道路上一般采用水泥混凝土路面。水泥混凝土路面较为粗糙,具有较大的太阳辐射吸收系数及比热容,是形成城市热岛效应的重要原因。此外,水泥混凝土作为一种刚性材料,温度的不均匀分布及波动都会在路面中引起较大的温度应力,与外荷载共同作用下很容易出现边角破损、开裂等病害。反射涂层在沥青路面上应用研究较多,但在水泥路面上的应用鲜有报道。因此,该文开展研究,分析反射涂层在水

收稿日期:2020-08-05

基金项目:河南省科技攻关项目(编号:172102210285);河南省高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号:NSFRF170921)

作者简介:杨飞,男,硕士,副教授。E-mail:41675948@qq.com

* 通信作者:陈家豪,男,博士,讲师。E-mail:chenjiahao@hngda@126.com

泥路面上的应用效果。

1 反射涂层在水泥路面的应用试验研究

1.1 试验概况

反射涂层主要是一种由空心玻璃微珠、成膜材料及助剂等组合成的复合材料,其中玻璃微珠主要起反射太阳光的作用,反射涂层的作用机理见图 1。此次试验制备了以氟硅改性丙烯酸为基料,空心玻璃微珠为主料的反射涂层。制备过程如下:取一定量的水、消泡剂及其他助剂,加入二氧化钛,快速搅拌形成浆液,再加入丙烯酸、硅丙、氟碳乳液及其他助剂,搅拌后加入空心玻璃微珠与陶瓷微珠等,稳定 40 min 后再加入调节助剂制成该文所用太阳光反射涂层。采用标准方法测得其太阳辐射吸收系数为 0.17,半球发射率为 0.81,相关性能满足 JGJ/T 359—2015 的半球发射率及反射率均大于 0.8 的要求^[17]。

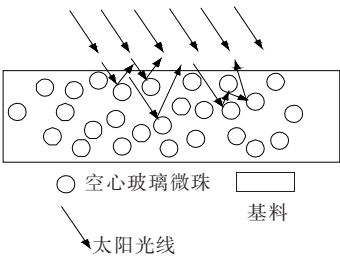


图 1 反射涂层的反射机理

上海地区属亚热带海洋性季风气候,夏季炎热,水泥路面病害较多,热岛效应也较明显。为研究反射隔热涂料的效果,在上海地区(121.47°E,31.23°5'N)某段水泥路面上开展试验研究。如图 2 所示,该路面结构由 20 cm 钢筋水泥混凝土+30 cm 水泥稳定碎石基层+20 cm 低剂量水泥稳定碎石底基层组成。采用探测器标定出路面钢筋位置,选定无钢筋处采用水钻打直径 4 cm、深 20 cm 的孔。预制长 20 cm 混凝土圆柱用于埋设图 3 所示的 pt100 铂电阻温度传感器,传感器具体位置见图 2。放入预埋柱和传感器后灌入细砂浆嵌缝封口,并架设气象站对风速、气温进行实时监测。采样间隔均为 0.5 h。施工结束后路面见图 4。

1.2 涂刷反射涂层对水泥路面温度的影响

涂层施工完成后,监测了 2018 年 8 月 12 日上海地区高温天气下反射涂层水泥路面温度,并与未涂刷涂层路面进行了对比,同时气象站记录了当日气温和

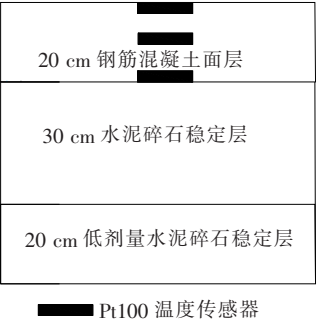


图 2 传感器布置



图 3 Pt100 温度传感器



图 4 涂刷反射涂层后的路面

风速的变化情况。

图 5 为当日气温和风速的变化曲线,当日最高气温达 41℃,太阳光照强烈,夜间风速较小,约 0.75 m/s,白天风速呈先增大后减小的规律。这些气象因素变化规律说明当日是典型的夏季高温天气,可以选为代表天气用以分析反射涂层效果。

图 6 给出了反射涂层对路面板表面、中部、底部温度及温度梯度的影响规律。图 6(a)表明:2018 年 8 月 12 日水泥路面板表面最高温度出现在 13:00 左右,未使用反射涂层时高达 59.6℃,使用反射涂层后表面温度降为 51.4℃,降低 8.2℃,且当日夜晚路面最低温度也超过 32℃;图 6(b)表明:路面板中部最高温度出现在 16:00,比板表面最高温滞后 3 h 左右,且未使用涂层时,最高温为 49.7℃,使用后降为 41℃,降低 8.7℃;图 6(c)表明:路面板底部最高温出现在 18:00,比板中部滞后约 2 h,且未使用反射涂层时路面板底部温度为 43.8℃,使用反射涂层后路面板底部

温度降为 37.2℃,降低 6.6℃。路面板内温度为不均匀分布,忽略非线性部分,路面板温度可近似为沿垂向线性分布。温度梯度可由板上表面温度减去底面温度除以板厚得到;图 6(d)给出了当日板的温度梯度变化规律,最大正温度梯度出现在 13:00 左右,未使用反射

涂层时,温度梯度为 96.1℃/m,使用反射涂层后温度梯度为 64.4℃/m,降低 31.7℃/m。由此可见:反射涂层对水泥路面板温度具有明显影响,可显著降低板温度及温度梯度。

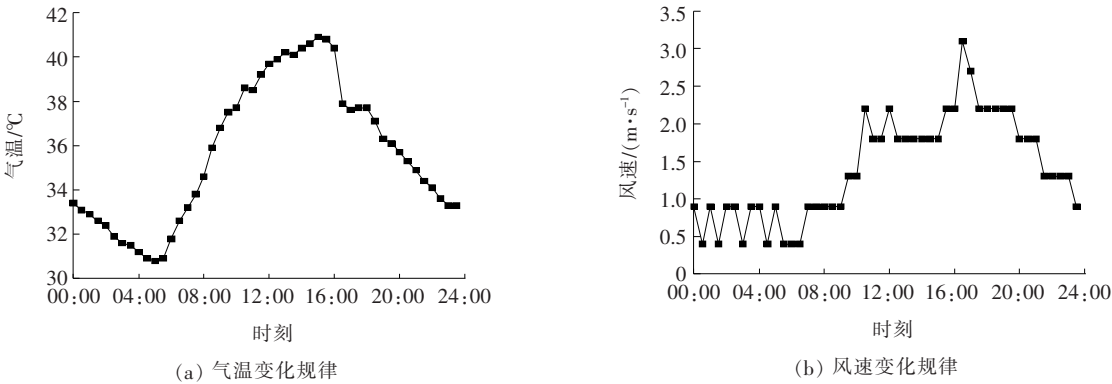


图 5 上海地区典型夏季高温天气下的气温和风速

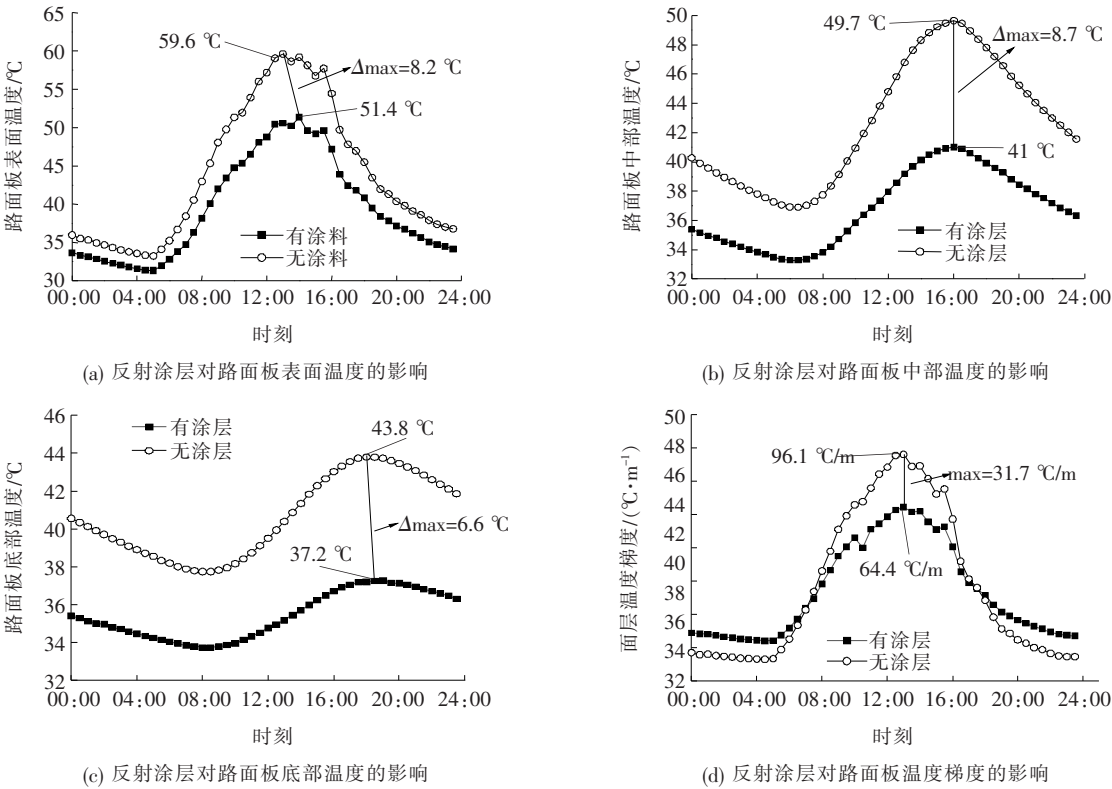


图 6 反射涂层对路面板温度特性的影响

2 反射涂层对水泥路面板翘曲的影响

水泥混凝土作为一种刚性材料,不均匀的温度分布在板内引起应力。最大正温度梯度(板上表面温

度高于下表面温度)作用下,板有中心拱起,四角向下的趋势,最大负温度梯度作用下板有四角上拱中心向下的趋势。可见温度梯度破坏了原本的均匀支承状态,如有车辆荷载额外作用,此时很容易出现板角开裂、压碎等病害。上文已分析了反射涂层对板温度梯

度的影响,现分析反射涂层对水泥路面板受力及变形的影响。

最大温度梯度引起的最大翘曲应力可按下式计算^[18]:

$$\sigma_{t,max} = \frac{\alpha_c E_c h_c T_g}{2} B_L \tag{1}$$

式中: α_c 为混凝土的线膨胀系数($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$); E_c 为混凝土弹性模量(GPa); T_g 为温度梯度($^{\circ}\text{C}/\text{m}$); h_c 为板厚(m); B_L 为综合翘曲应力和内应力的温度应力系数,按下式计算:

$$B_L = 1.77e^{-4.48h_c} C_L - 0.131(1 - C_L) \tag{2}$$

式中: C_L 为混凝土面层板的温度翘曲应力系数,按下式计算:

$$C_L = 1 - \frac{\sinh t \csc t + \cosh t \sin t}{\csc t \sinh t + \sinh t \csc t} \tag{3}$$

式中 t 按下式计算:

$$t = \frac{L}{3r} \tag{4}$$

式中: L 为板长(m); r 为面层相对刚性半径(m)。

计算参数物理意义及取值如表 1 所示。

将表 1 各参数代入式(1)~(4),得到 2018 年 8 月 12 日路面板内最大翘曲应力随时间的变化规律如图 7 所示。图 7 表明:没有反射涂层的路面板最大翘曲应力在 13:00 时达到最大值 2.16 MPa,使用反射涂层后,最大翘曲应力为 1.45 MPa,减小了 0.71 MPa,反射涂层能有效降低翘曲应力约 30%。

表 1 路面板翘曲应力计算参数

物理量	单位	数值
混凝土线膨胀系数 α_c	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	10
混凝土弹性模量 E_c	MPa	31 000
混凝土泊松比		0.3
板厚 h_c	m	0.2
板长 L	m	4
路床顶层回弹模量 E_0	MPa	130
水泥碎石稳定层回弹模量 E_1	MPa	300
低剂量水泥碎石稳定层回弹模量 E_2	MPa	180

3 水泥路面反射涂层热岛效应缓解效果

路面板在吸收太阳能后,大部分能量通过对流换

热和红外线的方式又返还到空气中,导致空气温度升高,形成热岛效应。根据牛顿冷却定律,某一时刻以对流形式交换到空气中的热流密度为:

$$q_c = \mu_c (T_s - T_{\text{air}}) \tag{5}$$

式中: q_c 为单位时间进入空气的热量(W/m^2); T_s 为路面板表面温度($^{\circ}\text{C}$); T_{air} 为空气温度($^{\circ}\text{C}$); μ_c 为空气对流换热吸收系数 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})]$,由风速决定,可按式^[19]计算:

$$\mu_c = \begin{cases} 4.0v + 5.6 & v \leq 5.0 \text{ m/s} \\ 7.15v^{0.78} & v > 5.0 \text{ m/s} \end{cases} \tag{6}$$

除了对流形式外,路面板还以红外方式向空气辐射热量,根据 Stefan-Boltzmann 公式^[20],单位时间以辐射形式进入空气的热量为:

$$q_l = \varepsilon \sigma (T_s + 273.15)^4 \tag{7}$$

式中: q_l 为有效辐射热流密度(W/m^2); σ 取 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}^4)$; ε 为路面发射系数,有太阳光反射涂层时,发射率取前文实测值 0.81,无涂层时取混凝土值 0.88^[21]。

由此,由路面板进入空气的总热流为:

$$q = \mu_c (T_s - T_{\text{air}}) + \varepsilon \sigma (T_s + 273.15)^4 \tag{8}$$

由图 5 气温和风速数据及图 6(a)实测路面板表面温度可算得路面放热曲线如图 8 所示。

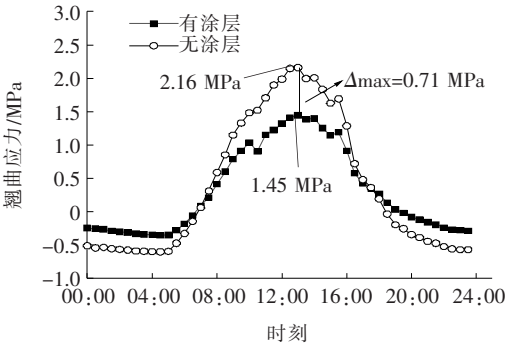


图 7 有无反射涂层时路面板最大翘曲应力变化规律

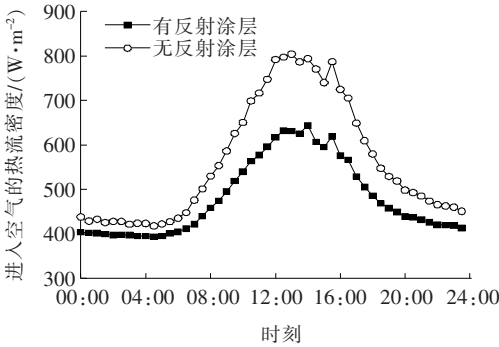


图 8 由路面进入空气的热流密度变化规律

$(0, t)$ 时间内空气增加的热量为图8曲线下方面积,即:

$$Q = \int_0^t q dt \quad (9)$$

式中: Q 为 1 m^2 路面向空气中释放的热量(kJ)。

$t=24\text{ h}$ 时算得无涂层时单位面积路面向空气中释放的热量为 $48\,626\text{ kJ}$,使用涂层后向空气中释放热量为 $41\,578.8\text{ kJ}$,相比减少 15% 。

4 结论

首先开展试验研究,测试了反射涂层对水泥路面温度及温度梯度的影响,其次计算了有无反射涂层对路面板翘曲应力的影响,再次分析了反射涂层对热岛效应的影响,主要得到以下结论:

(1) 应用反射涂层前,夏季高温天气下路面最高温度达 $59\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大正温度梯度为 $96.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$,反射涂层能够有效降低水泥混凝土路面温度约 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$,降低最大正温度梯度为 $31.7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。

(2) 应用反射涂层前,路面最大翘曲应力达 2.16 MPa ,应用反射涂层后最大翘曲应力为 1.7 MPa ,降低约 30% 。

(3) 使用反射涂层能有效减少水泥路面向空气中散发的热量约 15% ,一定程度上能缓解夏季热岛效应。

参考文献:

- [1] 彭少麟,周凯,叶有华,等.城市热岛效应研究进展[J].生态环境学报,2005,14(4):574—579.
- [2] 张洪清,宋志斌,杨庆,等.透水性铺装对城市生态环境改善的分析[J].水科学与工程,2005(S1):37—39.
- [3] AKBARI H, POMERANTZ M, TAHA H. Cool Surfaces and Shade Trees to Reduce Energy Use and Improve Air Quality in Urban Areas[J]. Solar Energy, 2001, 70(3): 295—310.
- [4] 谢西,姜成,林晨彤,等.透水混凝土路面堵塞及其恢复效果研究[J].中外公路,2019,39(1):46—49.
- [5] 武吉,凌天清,秦新,等.城市道路透水水泥混凝土路面净水特性研究[J].中外公路,2019,39(1):54—57.

- [6] 阮方,钱晓倩,钱匡亮.反射涂料的全年节能效果评价方法[J].建筑节能,2017,45(2):58—60.
- [7] 彭希琰,邹寒山,何宗健.城市热岛效应对城市生态系统的影响及其对策研究[J].江西科学,2003,21(3):257—259.
- [8] 张国庆.沥青路面热反射涂料研究进展[J].公路交通科技(应用技术版),2016,12(10):57—58.
- [9] 曹雪娟,刘攀,李瑞娇,等.路用热反射涂料的研究进展[J].电镀与涂饰,2016,35(18):943—948.
- [10] 徐永丽,张国峰.以改善城市和公路沿线环境为目标的反射型沥青路面的研究[J].中外公路,2008,28(4):64—66.
- [11] 张静.沥青路面热阻及热反射技术应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- [12] 冯德成,张鑫.热反射涂层开发及路用性能观测研究[J].公路交通科技,2010,27(10):17—20.
- [13] 郑木莲,程承,王彦峰,等.基于提高路面反照率的沥青路面降温技术试验研究[J].公路交通科技(应用技术版),2012,8(9):63—66.
- [14] 程承.热反射型沥青路面涂料制备与性能评价[D].西安:长安大学,2012.
- [15] 孙威.沥青路面热反射水性涂层材料制备与性能研究[D].南京:东南大学,2016.
- [16] 唐伯明,袁颖,曹雪娟,等.沥青路面热反射涂料老化规律及其机理探讨[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2015,34(3):47—51.
- [17] 福建省建筑科学研究院,恒亿集团有限公司.建筑反射隔热涂料应用技术规程:JGJ/T 359—2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [18] 中交公路规划设计院有限公司.公路水泥混凝土路面设计规范:JTG D40—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [19] SAETTA A, SCOTTA R, VITALIANI R. Stress Analysis of Concrete Structures Subjected to Variable Thermal Loads [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(3):446—457.
- [20] 苑中显,陈永昌.工程传热学——理论基础与专题应用[M].北京:科学出版社,2012.
- [21] 吴赣昌.半刚性路面温度应力分析[M].北京:科学出版社,1995.