

沥青路面降温涂层材料优化设计及其性能研究

冯锡荣

(中交资产管理有限公司,北京市 100000)

摘要: 为提高沥青路面热反射涂层降温效果及抗滑性能,该文通过对热反射涂层的降温机理研究优选了路用降温原材料,制备了一种路用降温涂层。开发了用于评价路用涂层降温性能的室内模拟太阳热辐射测试系统,通过对干燥时间、抗滑性能、黏附性能以及室内降温性能试验,确定了新型路用降温涂层的最佳配比以及涂抹量。结果表明:该涂层的黏附强度在涂刷量为 $0.4\sim 0.8\text{ kg/m}^2$ 时较高;抗滑性能随着 TiO_2 体积浓度的增加而降低,随着漂珠掺量的增大而增大,且漂珠掺量为20%左右时涂料抗磨损性能最优;通过室内热辐射模拟试验,试件上表面最大降温可达 $7.93\text{ }^\circ\text{C}$ 。在试件底部降温可达 $7.43\text{ }^\circ\text{C}$ 。该文所制备的路用降温涂层可以有效反射太阳辐射,有利于缓解城市“热岛效应”。

关键词: 道路工程;涂层;抗滑;降温

城市的热岛效应现象与城市沥青路面有着直接的关系,根据 Stefan—Boltzmann 定律,夏季路表温度为 $63\text{ }^\circ\text{C}$ 时,路面的长波辐射强度约为 672 W/m^2 ,而夏季太阳的直接辐射强度为 $700\sim 1\,000\text{ W/m}^2$,路表辐射接近太阳辐射,导致了城市热量难以下降。目前,用于缓解城市热的方法有增大城市绿化面积,修建通风廊道,采用具有高反射率和高红外发射率的“冷材料”等措施。

根据国内外研究现状,目前在路面上降低城市热的方法主要有:① 优化路面结构,采用大孔隙排水性沥青路面;② 路面洒水和降雨,通过蒸发作用降低路表温度;③ 改变路表物化性质,在沥青路面铺设具有反射太阳辐射的“冷材料”;④ 采用阻热材料,阻止热量向沥青路面内部传递。赵昕分析了路面光反射率对沥青路面降温及近地面大气的影响,认为路用热反射涂层较其他路面降温措施效果更佳;陈肃明利用有

- *****
- [9] 林东,詹国良,等. 活性粉末混凝土的聚合物改性及其机理分析[J]. 新型建筑材料,2016(11).
- [10] 李蓓,田野,等. 聚丙烯酸酯乳液改性砂浆微观结构与改性机理[J]. 浙江大学学报(工学版),2014(8).
- [11] 杨智硕,陈明霞,叶梅新. 玄武岩纤维对超高强混凝土力学性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品,2019(2).
- [12] 于婧,翟天文,梁兴文,等. 钢—PVA 纤维混凝土流动性及力学性能研究[J]. 建筑材料学报,2018(3).
- [13] Bhutta M A P, Ohama Y, Tsuruta K. Strength Properties of Polymer Mortar Panels Using Methy Methacrylate Solution of Waste Expanded Polystyrene as Binder [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(2): 779—784.
- [14] Chen Y G, YE W M, Zhang KN. Strength of Copolymer Grouting Material Based on Orthogonal Experiment [J]. Jcent South UniTechnol, 2009,16(1):143—148.
- [15] 肖力光,刘畅,王文彬. 聚合物改性混凝土的研究进展[J]. 吉林建筑工程学院学报,2013(6).
- [16] 钱慧丽,梁会忠,韩飞,等. 低掺量水性环氧树脂对高性能混凝土抗冲击韧性的研究[J]. 混凝土,2013(5).
- [17] 章凯. 环氧树脂乳液改性水泥砂浆性能与结构[J]. 新型建筑材料,2012(12).
- [18] 杨瑞芳. 聚合物改性水泥砂浆力学性能[D]. 清华大学硕士学位论文,2017.
- [19] 孟博旭,许金余,顾超,等. 苯丙乳液和 VAE 乳液改性水泥砂浆力学性能的试验研究[J]. 建筑科学,2019(1).
- [20] 王涛,许仲梓. 环氧水泥砂浆的改性机理[J]. 南京化工大学学报(自然科学版),1997(2).
- [21] 徐峰,刘林军. 聚合物水泥基建材与应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [22] 徐奎生. 环氧树脂乳液改性水泥砂浆性能的研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文,2012.

收稿日期:2019—12—30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51908194)

作者简介:冯锡荣,男,高级工程师。

限元建立路面温度场模型,研究了热反射涂层反射效果以及实际应用的可行性;长安大学汤琨将以聚丙烯树脂基材料制成的热反射涂料用于沥青路面,路面温度最高可以降低 12.5℃;路俊杰以聚丙烯酸树脂、二氧化钛和炭黑为原料制备了太阳热反射涂料,室外温度可以降低 7℃;任瑞采用硅丙乳液和空心玻璃微珠为原材料,以氧化铬和氧化铁为着色颜料,发现红色和绿色反射层降温可达 6.5℃以上。目前对路用热反射涂层的选择多基于零碎化片段,系统研究较少,室内试验也缺乏相应的规范体系,因此该文基于热反射理论,对热反射涂层的机理进行分析,以优化原材料以及配合比设计,并开发室内热辐射模拟系统,对涂层的降温性能进行评价。

1 路用降温涂层工作原理

沥青路面的热能交换与其所处的自然环境有关,沥青路面热量来源主要分为 3 大部分:太阳直接辐射、散射辐射及大气逆辐射,路面热量去向主要包括路面反射、对流交换及路面辐射。沥青路面热交换过程中,受太阳热辐射强度、气温等自然因素的影响,而这些因素都是在动态变化的,但当路表温度达到最大时路面即达到热平衡状态,沥青路面的热平衡方程可通过热流方程确定,热流方程公式如下:

$$q' = \alpha(E_s + E_{sky}) - E_{sur} - E_h \quad (1)$$

式中: q' 为沥青路面表面的净热流密度(W/m^2); α 为沥青路面的辐射吸收率; E_s 为太阳总辐射强度(W/m^2); E_{sky} 为大气热辐射量(W/m^2); E_{sur} 为大地热辐射量(W/m^2); E_h 为对流换热(W/m^2)。

当 $q' = 0$ 时,可得沥青路面热平衡方程:

$$\alpha(E_s + E_{sky}) = E_{sur} + E_h \quad (2)$$

通过式(2)可以看出:除去太阳总辐射、大气逆辐射、风速、湿度等外在因素,沥青路面降温的问题可以通过改变路面对辐射的吸收率 α 来改变沥青路面温度的平衡过程。如果能够降低 α ,则会减少沥青路面对外界辐射热量的吸收,从而能够使沥青路面在较低温度下达到热平衡。

2 路用降温涂层原材料选择

热反射涂层在常温下通常为黏稠状液体,主要由基体材料、颜料和外加剂 3 部分组成。其中基体材料是涂层组成里最重要的部分,对涂层力学性能起主要

作用;颜料主要是用于改善热反射涂层对太阳光的反射率和优化视觉效果;外加剂作为成膜作用的组成部分,可以改善施工条件。

2.1 基体材料选择

几种常见基体材料的太阳辐射基本性能见表 1。

表 1 几种常见基体材料的太阳辐射吸收率 α

涂层	颜料	α
有机硅-丙烯酸树脂	TiO_2	0.19
有机硅-醇酸树脂	TiO_2	0.22
丙烯酸树脂	TiO_2	0.24
环氧树脂	TiO_2	0.25
聚氨酯树脂	TiO_2	0.26

由表 1 可知:在涂层基体材料满足基本力学性能的基础上,应尽可能选择与沥青路面黏结性好、在自然环境变化下物理化学性质稳定的材料。该文选择的 E-51 环氧树脂是一种热固性高分子合成材料,常温下为透明黏稠液体,其固化后的强度高、黏结性好、柔韧性好、抗变形能力较好,在碱性环境中物理性能和化学性能稳定。其主要技术指标见表 2。

表 2 E-51 环氧树脂技术指标

环氧值/ moL	挥发值/ %	pH 值/ (20℃)	黏度(20℃)/ (MPa·s)	密度(20℃)/ (g·cm ⁻³)
0.515	≤0.8	6	10 000~22 000	1.19

2.2 颜料选择

颜料的散射能力直接影响了太阳热反射涂层的反射率。颜料与树脂混合材料对白光的散射能力 m 可以通过颜料与树脂的遮光指数计算得出,计算公式为:

$$m = \frac{n_p}{n_r} \quad (3)$$

式中: m 为颜料与树脂混合材料对白光的散射能力; n_p 为颜料的遮光指数; n_r 为树脂的遮光指数。

涂层材料对光的散射率越大,光程越短,路面吸收的太阳光能越少。由式(3)可知,为增大 m 值,提高涂层对光的反射能力,故选取遮光指数高的颜料与遮光指数低的树脂,几种颜料的遮光指数见表 3。

表 3 部分常用颜料的遮光指数

颜料	遮光指数	颜料	遮光指数
二氧化钛	2.80	氧化铝	1.70
氧化铁红	2.80	硫酸钡	1.64
氧化铁黄	2.30	硅酸镁	1.58
氧化锌	2.20	二氧化硅	1.54

为达到较好的热反射涂层降温效果,考虑化学稳定性,该文选用遮光指数较高的二氧化钛(表 4)和无机颜料作为涂层颜料。

表 4 TiO₂ 主要技术指标

颜色	密度/ (g·cm ⁻³)	黏附能力	遮盖能力	化学性质
白色	4.1	好	强	稳定

无机彩色颜料呈粉末状,密度为 2.2 g/cm³,粒径为 20~450 μm,有良好的光稳定性和化学稳定性,是优良的道路颜料。当颜料用量过少时,配制的涂层白色颗粒较多,降温性能更好,但路面反光度较高,对行车安全造成影响;颜料用量过多时,降温性能变差,有良好的视觉效果。推荐彩色颜料用量为 20%~50%,由于 20%~50%颜料用量的外观无明显差别,因而,该文选用颜料用量质量百分比为 30%。

2.3 外加剂

外加剂主要有成膜助剂、催干剂、湿润剂、发泡剂、分散剂和固化剂等,其主要作用要有辅助成膜作用、均匀分散树脂作用及提高施工和易性等,该文选用的外加剂主要有消泡剂、分散剂、固化剂和稀释剂。

水性消泡剂具备在水中易均匀分散、消除气泡效果良好、储存期间性能稳定等优点,该文选定消泡剂用量为涂层总质量的 0.4%,其主要技术指标见表 5。

表 5 水性消泡剂技术指标

外观	黏度(25℃)/ (MPa·s)	pH 值	分散性
乳白色	80~200	5.0~7.0	较好

分散剂使颜料在涂层中分散更均匀,而且还起到防止被分解的颜料二次粒子重新组合、降低涂料黏结度的作用。该文选择 SN-5040 分散剂,用量为涂层总质量的 0.3%~1%,其技术指标见表 6。

表 6 SN-5040 分散剂主要技术指标

外观	固体成分/%	pH 值	黏度/ (MPa·s)	离子 类型	溶解 性能
淡黄色液体	45	7.5	430	阴离子	溶于水

固化剂的技术参数见表 7,当固化剂用量过小时,等待开放交通时间过长,且易受污染,当固化剂用量过大时,施工质量不易控制,故需确定固化剂最佳用量。

表 7 固化剂主要技术参数

外观	密度/ (g·cm ⁻³)	相对 密度	分子量	固化性能
透明液体	0.977	1.02	279.32	常温快速固化

固化剂最佳用量通过如下公式确定:

$$m = \frac{M}{n \times a \%} \times E \times 100 \% \quad (4)$$

式中: m 为固化剂最佳用量; M 为胺的相对分子质量; n 为胺的活泼氢原子数量; a 为胺的纯度; E 为环氧树脂环氧值。

式(4)中各参数取值分别为: $M=1\ 000$, $n=1\ 000/48$, $a\%=1$, $E=0.512$,经计算得到固化剂最佳用量为 24.35%,同时,由于理论公式计算与实际应用会出现一定的偏差,故推荐固化剂最佳用量为 20%~30%。

稀释剂有活性稀释剂和非活性稀释剂两种,该文选用非活性稀释剂,非活性稀释剂和环氧树脂不会发生反应,并且在涂层固化时大部分会挥发,起到降低黏度、改善涂层施工和易性的作用。其取值取决于涂层黏度和施工和易性,该文推荐稀释剂用量为 10%~35%,其技术指标见表 8。

表 8 稀释剂技术指标

沸点/ ℃	挥发速率 (nBAc=1,25℃)	溶解参数/[$(\text{cal} \cdot \text{cm}^{-3})^{0.5}$]	黏度(20℃)/ (MPa·s)
58	5.6	10	0.314

3 热反射涂层配方

3.1 涂层配合比设计

以非统计法设计配置降温涂层,基体材料采用环氧树脂,变量为二氧化钛体积浓度和漂珠掺量,共设计了 6 种热反射涂层,配制比例见表 9。

表 9 热反射涂层各组分比例

降温 涂层 编号	TiO ₂ 体积浓 度/%	炭黑 用量/ %	漂珠 用量/ %	稀释 剂用 量/%	分散 剂用 量/%	消泡 剂用 量/%
1#	10	40	—	10~40	0.1~1.0	0.4
2#	15	40	—	10~40	0.1~1.0	0.4
3#	20	40	—	10~40	0.1~1.0	0.4
4#	15	40	10	10~40	0.1~1.0	0.4
5#	15	40	20	10~40	0.1~1.0	0.4
6#	15	40	30	10~40	0.1~1.0	0.4

表 9 中炭黑用量是指炭黑与 TiO_2 质量比,漂珠和稀释剂用量为各自占环氧树脂质量的比例,分散剂和消泡剂用量为占涂料总质量的比例。

3.2 涂层制备流程

当涂层各组分的用量确定后,进行涂层的制备,不同的制备流程配制的涂层,其性能也有一定的差别,该文涂层制备工艺流程见图 1。

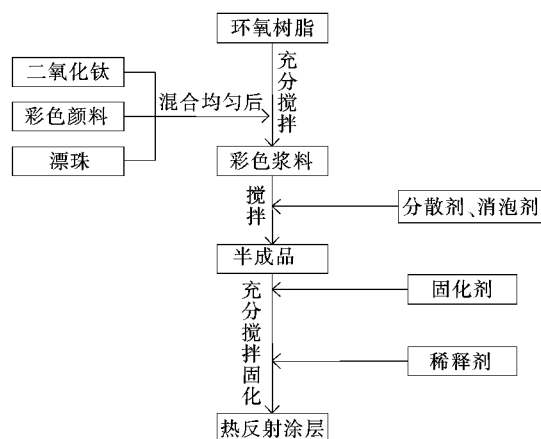


图 1 太阳热反射涂层制备流程

4 降温涂层性能

4.1 干燥时间

参照 JC/T 1015—2006《环氧树脂地面涂层材料》,测试不同涂刷量下涂层表干时间和实干时间,确定满足施工中道路开放时间的基础涂层配比,试验结果如表 10 所示。

由表 10 可知:该涂层的表干时间与实干时间均随温度的增加而减小,随着温度的升高,涂层固化速率增大。表干时间随单位涂刷量的增加变化幅度较小,当涂刷量从 0.4 kg/m^2 增加到 0.8 kg/m^2 时,表干时间仅减小 0.7 h ,合理涂刷量范围内涂层表干时间受涂刷量的影响较小。当涂刷量从 0.4 kg/m^2 增加到 0.8 kg/m^2 时,实干时间减小了 5.5 h ,有助于快速开放交通。当涂刷量增加到 1 kg/m^2 时,表干时间与实干时间反而增大,表明随着单位涂刷量的增大,涂层表面易于干燥,但内部涂层材料干燥时间会逐渐增长,从而导致开放交通时间大幅增加。

表 10 热反射涂层各组分比例

涂刷量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	表干时间(不黏轮时间)/h			实干时间(初步开放时间)/h		
	10 °C	20 °C	30 °C	10 °C	20 °C	30 °C
0.4	6.0	5.4	4.9	24.0	21.8	18.5
0.6	5.5	5.1	4.0	20.0	19.0	17.5
0.8	5.3	5.0	3.9	18.5	17.6	16.8
1.0	5.8	5.2	4.3	21.0	20.1	18.6
规范要求 (JC/T 1015—2006)	≤ 8			≤ 24		

4.2 抗滑性能

按照 JTG E60—2008《公路路基路面现场测试规程》中 T0964 试验规程,研究 0.4 、 0.6 和 0.8 kg/m^2 3 种涂沫量下 6# 涂层的抗滑性能,采用 0.6 kg/m^2 的涂沫量对 1#~6# 涂层进行抗滑性能试验,试验温度为 $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$,试验结果如图 2、3 所示。

由图 2 可看出:对于同一种涂料来说,相比于对照组无涂层试件,增设涂层后路面摆值大幅度下降。当涂刷量为 1 kg/m^2 时,摆值较无涂层试件降低了 21 BPN,表明涂层降低了路面抗滑能力,这是由于随着涂刷量的增大,原路面较多空隙被覆盖,路面构造深度逐渐减小,抗滑性能下降。在合理涂沫量范围内,摆值均大于 45,可以满足高等级公路路面的抗滑要求。由图

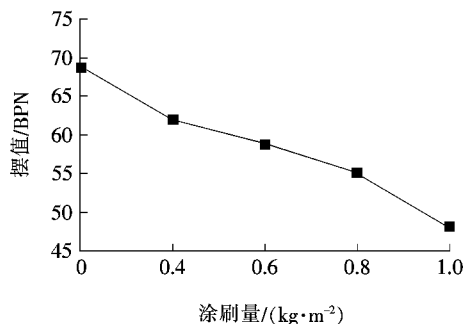


图 2 6# 涂层不同涂刷量下的摆值

3 可以看出:1#~3# 涂层的摆值逐渐降低,表明在相同涂刷量下,随着 TiO_2 体积浓度的增加,该降温涂层的抗滑性能逐渐降低;4#~6# 涂层的摆值逐渐增大,

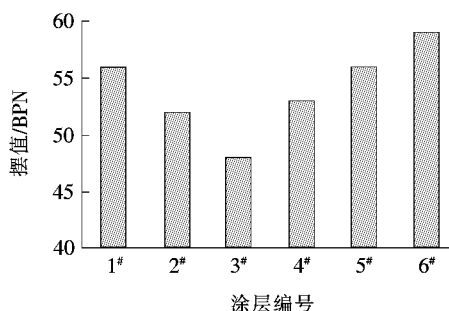


图3 6种涂层抗滑性能

表明在相同涂刷量下,该降温涂层的抗滑性能随着漂珠掺量的增加而逐渐提高,这是由于漂珠分布均匀后的颗粒形态增大了涂层表面的粗糙程度,对路面抗滑性能产生了有利的影响。

4.3 黏附性能

测试涂层的黏附性能采用拉拔试验,所用仪器为PosiTest 自动式黏结力拉拔仪,试验方法如下:

(1) 制备试验所用标准马歇尔试件,测量并计算各试件截面面积。

(2) 计算每种涂刷量和截面面积下的不同种类涂层涂刷质量,将涂料涂刷至相应试件上。

(3) 室温固化 24 h 后,将拉头与试验涂层用 AB 胶黏结后静置 24 h。

(4) 将试样置于 25 ℃ 的烘箱中,恒温 2~3 h。

(5) 测试涂层的黏附强度,试验结果见表 11。

表 11 热反射涂层黏附强度

涂层 编号	不同涂刷量(kg/m ²)的黏附强度/MPa				
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
1#	0.26	0.59	1.55	1.70	0.75
2#	1.09	1.39	1.58	1.99	1.63
3#	1.02	1.13	1.32	1.55	1.23
4#	0.67	1.60	1.47	1.45	1.31
5#	1.44	1.48	1.53	1.39	1.31
6#	1.05	1.88	1.13	1.18	1.11

由表 11 可以看出:拉拔试验破坏界面多数为涂层与试件的结合面,6 种热反射涂层的黏附性随着涂层涂刷量的增加先升高后降低;1#~3# 热反射涂层在涂刷量为 0.8 kg/m² 时黏附性最强,4# 和 6# 涂层在 0.4 kg/m² 时黏附性最强,5# 涂层在涂刷量为 0.6 kg/m² 时具有最强的黏附性。这是由于当涂刷量较小时,涂层不能形成连续膜,黏结力有限;随着涂刷量增加,涂层厚度接近最佳,黏结力增强;当涂刷量继续

增大时,涂层厚度大于最佳厚度,拉拔头与混合料表面含有多余自由涂料,因此黏结力降低。

涂层的涂刷量不宜过少也不宜过多。过少的涂刷量会导致涂层的耐久性和降温效果大大降低;过多的涂刷量会严重影响涂层的抗滑性能,且增加成本。从 1#~6# 涂层的黏附性试验结果可以看出,6 种涂层在涂刷量为 0.6~0.8 kg/m² 时具有较强的黏附强度,因此该文根据黏附性推荐的涂刷量范围为 0.6~0.8 kg/m²。

4.4 降温性能

为研究路用涂层的降温性能,评价测量热反射材料的降温能力,该文基于太阳光源模拟开发了室内模拟辐射试验系统。测试使用的光源为与太阳光谱相近的碘钨灯,为防止温度过高引起试验误差,该光源辐射功率取用 300 W。辐射强度试验仪由两部分构成,即 JTBQ-1 总辐射表与辐射转换器。环境箱自行研制,用于控制环境温湿度以及监测环境变化,温度采集与接收装置为 L93-4 高精度温度记录仪。

试验所制车辙板试件尺寸为 50 cm×50 cm×5 cm,试验起始保温温度为 20 ℃,预先保温 3 h,模拟辐射时间 6 h。测温点取试件上表面和下表面,进行平行试验。

选择 1#~6# 涂料,涂刷量为 0.6 kg/m²,每种涂料测试两个试件,试验结果取其平均值(图 4~6)。

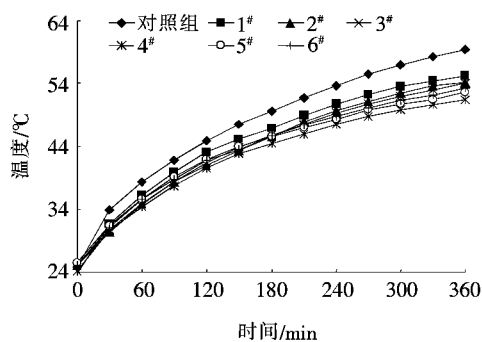


图4 不同涂层试件上表面温度

由图 4~6 可得:

(1) 涂刷 6 种热反射涂层后试件表面及底部温度均下降,其中顶部温度最高可降 7.93 ℃,试件底部可降 6.3 ℃,6 种涂层试件表面降温幅度由大到小顺序为 4#>5#>6#>3#>2#>1#,试件底面降温效果由大到小顺序为 4#>6#>5#>3#>2#>1#。

(2) 1#~3# 涂层试件表面最大降温幅度分别为 4.15、5.15 和 5.35 ℃,3 种二氧化钛体积浓度的涂层降温效果由强到弱的顺序为 20%>15%>10%,这表

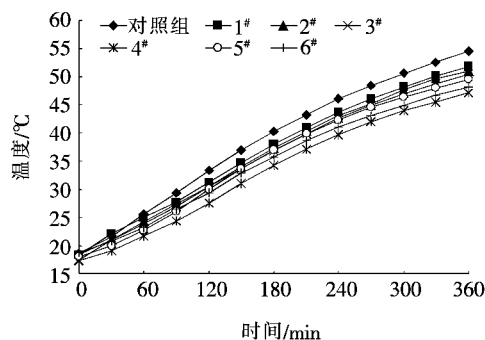


图 5 不同涂层试件下表面温度

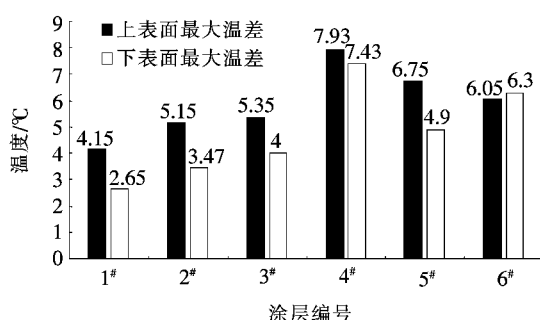


图 6 不同涂层试件各层位与对照组最大温差

明在浓度小于 20% 时,随着二氧化钛体积浓度的增加,涂层的降温效果逐渐增强,这是由于二氧化钛颗粒具有高遮盖力和高散射率,可以减小光辐射而降低了试件表面温度。

(3) 4#~6# 涂层试件表面最大降温幅度分别为 7.93、6.75 和 6.05 °C,3 种漂珠掺量的涂层降温效果顺序为 10% > 20% > 30%,通过对比 2# 涂层可知,漂珠的掺加大幅度降低了试件表面温度,这是由于漂珠表面为光滑曲面,涂层散射率增强从而减少了试件吸收的热辐射,而漂珠掺量越大涂层降温效果越差,可能是由于过多地掺加涂层使得树脂不能完全包裹漂珠颗粒而不能形成连续的薄膜,漂珠发生团聚使得涂层散射率降低,进而反射率下降,降温效果变差;5# 涂层试件底面降温效果低于 6# 涂层,原因是漂珠的空心结构起到了阻热功能,从而降低了试件内部温度,但对表面降温产生了不利影响。

(4) 综合 1#~6# 涂层的降温效果以及抗滑性能和黏附性能等影响因素,得到二氧化钛掺量为 15% 效果最优。

5 结论

通过对热反射涂层的降温机理研究,优选了路用降温原材料,制备了一种路用降温涂层。开发了用于评价路用涂层降温性能的室内模拟太阳热辐射测试系统,通过对干燥时间、抗滑性能、黏附性能以及室内降温性能试验,确定了新型路用降温涂层的最佳配比以及涂抹量。通过干燥性试验研究,得到涂层 0.4~0.8 kg/m² 涂刷量范围内表干时间受涂刷量的影响较小,涂层涂刷量为 1 kg/m² 时干燥时间反而增加。通过黏附性试验,发现涂层在涂刷量为 0.4~0.8 kg/m² 时具有较强的黏附强度。通过抗滑试验研究,表明当涂层中漂珠掺量增大时会提高路面抗滑能力,增大 TiO₂ 体积浓度会导致路面抗滑能力降低。试验还对该涂层的抗滑能力进行了研究,而其抗磨损能力有待进一步验证。通过对 6 种热反射涂层进行室内模拟热辐射试验,得到 6 种热反射涂层均能大幅度降低试件表面及内部温度。其中 4# 涂层降温效果最明显,试件上表面最大降温可达 7.93 °C,试件下表面最大降温可达 7.43 °C。说明所制备的太阳热反射涂层的应用可以有效降低路面温度,有利于缓解城市“热岛效应”。

参考文献:

- [1] 郑木莲,何利涛,高璇,等.基于降温功能的沥青路面热反射涂层性能分析[J].交通运输工程学报,2013(5).
- [2] 赵昕.沥青路面热效应发生理论及调节方法[D].长安大学博士学位论文,2011.
- [3] 陈肃明,黄文红,罗婷倚,等.热反射涂层路面温度场模型建立与分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2012(1).
- [4] 汤琨.遮热式路面太阳热反射涂层研究[D].长安大学硕士学位论文,2009.
- [5] 路俊杰.遮热式路面性能评价和施工工艺研究[D].长安大学硕士学位论文,2009.
- [6] 任瑞.沥青路面热反射层材料与性能研究[J].中外公路,2018(6).
- [7] 李源渊,张亚鹏,孙建勇,等.沥青路面材料参数对路面温度场的影响研究[J].中外公路,2012(6).
- [8] 沙爱民.环保型路面材料与结构[M].西安:科学出版社,2012.