

文章编号:1671-1637(2013)05-0010-07

基于降温功能的沥青路面热反射涂层性能分析

郑木莲¹, 何利涛², 高璇³, 王飞¹, 程承⁴

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 陕西省交通建设集团公司, 陕西 西安 710075;
3. 中交通力建设股份有限公司, 陕西 西安 710075; 4. 西南林业大学 土木工程学院, 云南 昆明 650224)

摘要:为改善沥青路面夏季高温稳定性, 缓解城市热岛效应, 将一种新型热反射涂层涂布于沥青路面表面, 分析了热反射涂层的工作原理, 研发了热反射型沥青路面热物理环境性能综合测试设备, 利用测试设备研究了不同颜色涂层对沥青混合料的降温效果, 并利用摆式摩擦仪评价了不同厚度涂层的抗滑性能。分析结果表明:白色热反射涂层降温效果优于灰色涂层, 试件表面白色热反射涂层室内降温极限可达 $18\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 在试件内部 2.5 cm 处可降低 $9.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 灰色涂层表面可降低 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$; 热反射涂层的降温能力随涂层厚度的增大而增大, 但达到一定厚度后, 降温效果趋于恒定, 综合考虑降温效果与造价, 热反射涂层最佳用量为 $0.6\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$; 随着涂层厚度的增大, 表面抗滑性能降低, 需要在涂层中添加抗滑颗粒, 以满足行车安全性要求。

关键词:道路工程; 沥青路面; 路面温度; 热反射涂层; 车辙; 热岛效应

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

Analysis of heat-reflective coating property for asphalt pavement based on cooling function

ZHENG Mu-lian¹, HE Li-tao², GAO Xuan³, WANG Fei¹, CHENG Cheng⁴

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Provincial Communications Construction Group, Xi'an 710075, Shaanxi, China; 3. Zhongjiao Tongli Construction Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China;
4. School of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: In order to improve asphalt pavement high temperature stability in summer and mitigate urban heat island effect, a new type of heat-reflective coating was applied on the surface of asphalt pavement. The working principle of heat-reflective coating was analyzed, the thermal-physical environment performance comprehensive test device of heat-reflective asphalt pavement was developed, and the cooling effects of asphalt mixtures with different color coatings were studied by using the device. The skid resistance performances of coatings with different thicknesses were evaluated based on pendulum type friction coefficient measuring instrument. Analysis result shows that the cooling effect of white heat-reflective coating is better than grey coating, white heat-reflective coating on specimen can cool $18\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ within door test, the temperature of 2.5 cm place inside specimen reduces by $9.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the temperature of grey coating surface reduces by $12\text{ }^{\circ}\text{C}$. The cooling ability of heat-reflective coating increases with the increase of coating thickness, but it will tend to be constant while reaching certain thickness. The

收稿日期: 2013-04-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008033); 陕西省科学技术研究发展计划项目(2011kjxx43); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011ZD017); 陕西省交通科技项目(10-29K)

作者简介: 郑木莲(1977-), 女, 山东蒙阴人, 长安大学教授, 工学博士, 从事道路工程结构与材料研究。

sensible dosage of heat-reflective coating is $0.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ comprehensively considering cooling effect and cost. With the increase of coating thickness, the surface skid resistance performance of pavement reduces, and it is recommended to spread antiskid particles in the coating to meet traffic safety requirements. 4 tabs, 11 figs, 16 refs.

Key words: road engineering; asphalt pavement; pavement temperature; heat-reflective coating; rutting; heat island effect

Author resume: ZHENG Mu-lian(1977-), female, professor, PhD, +86-29-82334846, zhengmulian@163.com

0 引言

沥青路面由于具有平整度高、行车舒适、开放交通快、易于养护等优点,广泛应用于城市道路及各等级公路,但其组成材料色泽黑,对太阳热辐射吸收率高达85%~95%^[1],使得沥青路面在太阳热辐射长时间照射下表面温度极易升高。特别在夏季,由于太阳的高强度辐射,沥青路面吸收大量热量并蓄积在路面结构中,使得路面温度升高,这样会使沥青混合料承载能力降低,在车辆荷载作用下极易出现车辙^[2]。此外,随着中国公路建设的飞速发展和城市化进程的急速推进,沥青路面的通车里程迅速提高,大量的地面空间(尤其是绿地)被沥青路面所代替^[3]。在炎热夏季当草坪温度为32℃时,沥青路表面温度可高达63℃,根据斯蒂芬-玻尔兹曼(Stefan-Boltzmann)定律,此时路面的长波辐射强度约为 $672 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,几乎接近夏季太阳的直接辐射强度($700 \sim 1\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$),具有如此高辐射能力的沥青路面加之城市密集的建筑群,使城市年平均气温比郊区高出10℃甚至更多,夏季城市局部地区的气温有时甚至比郊区高出6℃以上,因而加剧了城市的热岛效应。

目前,为解决沥青路面的车辙问题,主要是对沥青混合料采取调整级配,提高沥青分级标准,掺加抗车辙剂等措施^[4-5],但是这些措施由于没有考虑到沥青混合料自身对太阳热辐射的吸收特性以及诱导路面温度升高的主要环境因素,在高温季节不能从根本上抑制路面温度的升高^[6]。此外针对城市热岛效应问题,增加城市绿化,提高森林覆盖率,扩大草地、湿地和水域的面积不失为最有效的措施,但却难以实现,因为城市空间紧凑,布局很不均衡,在市区绝大部分面积被建筑物和道路覆盖,有资料表明,中国城市道路的覆盖率已达到7%~15%,特大城市可能超过20%^[7],因而亟需一种新型环保的措施来彻底解决车辙和热岛效应这两大危害。

太阳辐射光谱主要分为紫外区(波长小于 $0.40 \mu\text{m}$)、可见光区(波长为 $0.40 \sim 0.76 \mu\text{m}$)和红外区(波长大于 $0.76 \mu\text{m}$),波长在 $0.15 \sim 4.00 \mu\text{m}$ 之间的辐射能占总辐射能的99%以上。太阳热反射涂层对其中 $0.76 \sim 2.50 \mu\text{m}$ 辐射波段具有高反射率,未被反射而吸收的能量则以长波($2.5 \sim 15.0 \mu\text{m}$)的形式发射到外部空间^[8]。综合反射绝缘和辐射致冷双重功能^[9],应用于沥青路面的热反射涂层能有效降低路表和路面结构层内部温度,进而可显著减少沥青路面车辙等高温病害;改变沥青路面的热辐射吸收特性,把太阳辐射的能量反射到外层空间,减少路面结构层对太阳热的吸收及蓄积,路面温度的降低相应减轻了夜间其向大气的逆向热传导,可有力缓解城市的热岛效应^[10]。本文将一种新型热材料涂布于沥青路面表面以改善沥青路面夏季高温稳定性,缓解城市热岛效应,分析了热反射涂层的工作原理,自主研发了热反射型沥青路面热物理环境性能改善综合测试装置,利用测试装置研究了不同颜色涂层对沥青混合料的降温效果,同时利用摆式摩擦仪评价了不同厚度涂层的抗滑性能。

1 沥青路面热反射涂层的工作原理

应用于沥青路面的热反射涂层是一层涂布于沥青路面表面的功能性涂层材料,可改善沥青路面的黑色特性,并通过反射太阳光达到减少面层中的蓄热量,抑制路面温度上升的效果。

路用热反射涂层的工作原理主要是隔绝沥青材料直接接收太阳辐射,而通过涂层中的功能粒子将辐射反射或将吸收的热能辐射到外部空间,从而降低路面表面及内部温度^[11-13]。由于大气对太阳辐射的吸收作用,到达地面的太阳辐射波长多在 $0.25 \sim 2.50 \mu\text{m}$,能量主要集中在可见光区和近红外光区,因而太阳热反射涂料应具备对可见光及近红外光的高反射;由于吸收的辐射能量以长波的形式发射到外部空间,因而热反射涂层应满足对远红外光的高

发射^[14]。图 1 为路用热反射涂层工作原理。

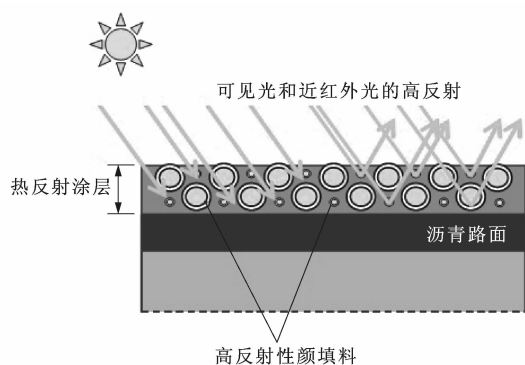


图 1 热反射涂层工作原理

Fig. 1 Working principle of heat-reflective coating

2 试验材料与方法

2.1 热反射涂层材料的组成

热反射涂层材料主要由树脂、颜填料和溶剂组成,其中要求树脂的透明度高,透光率在 80% 以上,在设计树脂时应避免树脂中含有 C-O-C、C=O、OH 等基团。本试验采用了改性双酚 A 型环氧树脂作

表 2 AC-16 级配

Tab. 2 AC-16 gradation

筛孔尺寸(方孔筛)/mm	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过质量百分率/%	100.0	95.0	84.0	70.0	48.0	34.0	24.5	17.5	12.5	9.5	6.0

试验基本步骤为根据事先拟定的试验条件,调控温度控制机使环境箱处于规定温度,将试件预处理后置于载物台上,调节转动支架使载物台转动到预设角度,调节好光电传感器,启动电源总开关,日光模拟光源开始工作,开启温度传感器开关,温度传感探头开始工作,整个试验过程开始。试验过程中,视具体情况通过温控调节按钮和日光模拟光源强度控制按钮,调节温控机输出温度和辐射强度,可以模拟道路在不同季节里温度、太阳辐射强度和辐射角变化,通过数字记录显示仪读取测温试验数据。

光源辐照车辙板试件 30 min,数字记录显示仪记录试件表面和内部温度,对比标准试件评价热反射涂层的性能,最后用摆式摩擦仪测定热反射型铺装试件的抗滑性能。室内试验测试设备见图 2。

3 降温性能研究

3.1 沥青路面温度实测

中国夏季炎热,高温持续时间长,尤其是北方内陆地区夏季伏旱与城市的热岛效应共同作用,加剧了沥青路面高温车辙等病害。

为结合料,金红石型钛白粉(TiO_2)为颜填料的反射涂层。改性后的树脂黏度低,有利于机械化的喷洒施工,金红石型钛白粉硬度高,化学稳定性好,是性能优异的颜填料。环氧树脂的性能参数见表 1。

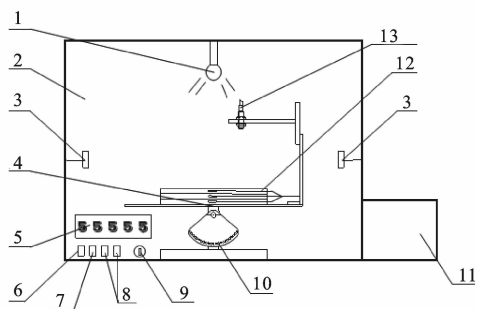
表 1 环氧树脂性能参数

Tab. 1 Performance parameters of epoxy resin

树脂类型	环氧当量/ ($\text{g} \cdot \text{eq}^{-1}$)	粘度(25 °C)/ ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	形态	特点
环氧树脂	184~194	9 000~13 000	液态	低粘度

2.2 试验方法

采用表 2 级配,成型规格为 30 cm × 30 cm × 5 cm 的 AC-16 车辙试件,将其切割成 15 cm × 15 cm × 5 cm 的小件,在其侧面中部 2.5 cm 处用钻机钻孔,钻孔深度约为 8 cm,试验时将传感器埋入钻孔中并用沥青封孔。在沥青混合料车辙板小件表面均匀涂刷一层热反射涂料,将试件放置在自行研制的测试设备中,在日光模拟光源下进行室内试验。日光模拟光源由与太阳光色温相近的氙气灯灯头、电子镇流器和线组构成。



1—日光模拟光源;2—环境箱;3—温度传感探头;4—载物台;
5—数字记录显示仪;6—日光模拟光源强度控制按钮;7—温度
传感器开关;8—温控调节按钮;9—电源总开关;10—转动支架;
11—温度控制机;12—试件;13—光电传感器

图 2 自行研制的测试设备

Fig. 2 Self-developed test device

本文研究以西安市为例,西安市位于中国内陆腹地,地处东经 $107^{\circ}40' \sim 109^{\circ}49'$ 和北纬 $33^{\circ}39' \sim 34^{\circ}45'$ 之间,在 SHRP 的研究中,认为沥青路面表面温度 T_1 与空气温度 T_2 之间关系为

$$T_1 = T_2 - 0.006 \ 18L^2 + 0.228 \ 9L + 24.4$$

式中: L 为纬度。

根据上述回归模型计算出沥青路面温度高出气温范围在 $23.6^{\circ}\text{C} \sim 25.5^{\circ}\text{C}$,根据《公路沥青路面设

计规范》(JTG D50—2006),西安最热 7 d 多年平均值为 36℃,98%保证率的最高气温为 38℃,路面温度将达到 59.0℃~63.5℃。图 3 为实测的西安市绕城高速公路夏季日典型气温和路面温度。

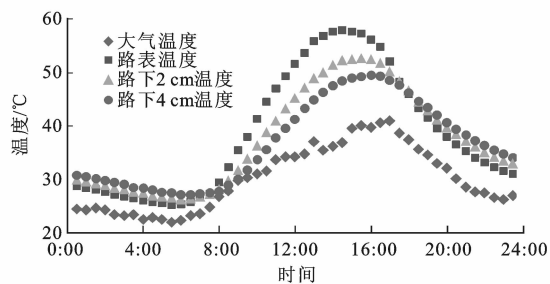


图 3 实时温度采集
Fig. 3 Real-time temperature acquisition

从图 3 可以看出,当日的最高气温出现在 17:00 时,温度为 40.9℃,路表的最高温度更是达到 58.0℃,路面温度与气温最大相差超过 20℃,路面内部温度由于温度梯度影响,峰值随深度约向后延迟 30 min。在如此高的温度下,由于沥青材料本身的热塑特性,高温时易变软产生塑性流动,加之交通渠化、车辆超限超载严重和交通量激增等因素,使夏季成为了沥青路面产生车辙病害的高危时段。

已有研究通过室内对比试验与实体工程的调查发现,路面车辙是在高温下短时间内形成并发展到严重情况,而非长期累积的行车荷载变形所致。表 3 给出了改变试验温度对沥青混合料的动稳定度和车辙深度影响的测试结果。

表 3 不同温度时车辙试验结果

Tab. 3 Rutting test results under different temperatures

试验温度/℃		40	45	48	52	55	58	60	70
动稳定度/ (次·mm ⁻¹)	SBS 改性沥青混合料	—	12 283	—	9 980	8 872	4 825	2 546	1 283
	壳牌基质沥青混合料	2 382	1 943	1 526	604	—	—	281	281
车辙深度/mm	SBS 改性沥青混合料	—	1.402	—	1.066	1.443	1.571	3.361	4.359
	壳牌基质沥青混合料	2.729	3.278	3.326	5.892	—	—	10.512	—

从表 3 可以看出,使用 SBS 改性沥青的混合料试件车辙试验结果明显优于基质沥青混合料的试验结果,但两者动稳定度和车辙深度均随着温度升高而性能降低。温度变化 5℃对测试结果也有较大影响,尤其是在试验温度超过 55℃以后,由此可见,在夏季高温时节,如果能通过技术措施降低沥青路面温度,即便只有 5℃,也能有效降低路面车辙病害的发生。

3.2 室内降温性能模拟试验

室内降温性能测试时,所成型试件采用的沥青为 A 级中海 70# 沥青,集料为咸阳彬县石灰岩,技术指标均满足现行规范要求。

3.2.1 降温性能

不同颜色的热反射涂层反射降温效果存在明显差异,白色在所有颜色中反射率最高,几乎达到 90%,白色涂层降温效果最优,见图 4。

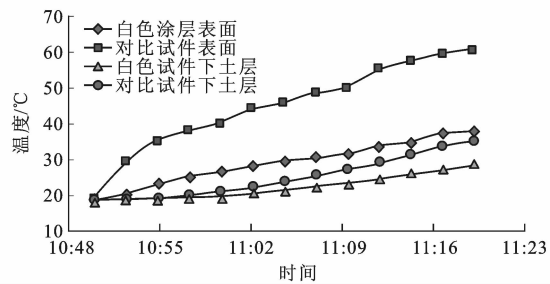


图 4 白色涂层降温极限
Fig. 4 White coating cooling limit

从图 4 可以看出,用日光模拟光源照射 30 min 后,未涂刷涂层的对比试件温度高达 60.9℃,而有白色涂层的试件仅为 38.1℃,两者相差 22.8℃;在辐射初期对比试件就剧烈升温,5 min 上升了 16.8℃,而白色涂层试件在 30 min 内升温平缓;试件下土层的温度相差 7℃,并随蓄热的向下传递它们之间的温度差将会进一步拉大。

通过埋设在试件内部的传感器,可以清晰地检测到在辐照 30 min 结束时刻,试件内部中心的温度差为 5.5℃。下一时刻虽然不再接受辐照,但由于温度梯度的滞后性,内部蓄热量依旧在增加,15 min 后温度达到最高,此时两者之间温度差为 9.4℃,见图 5。

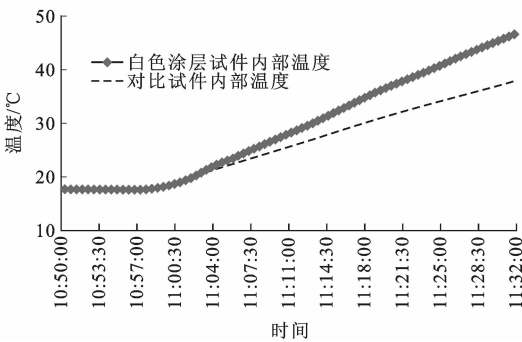
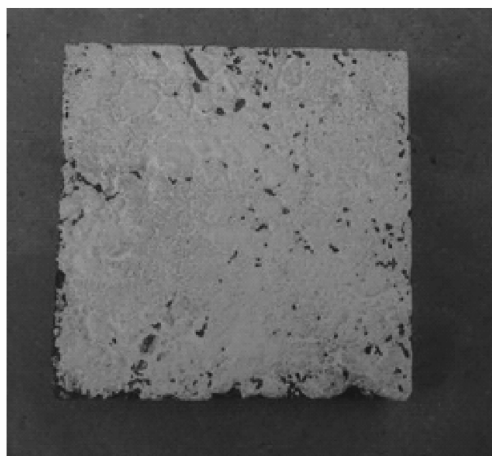
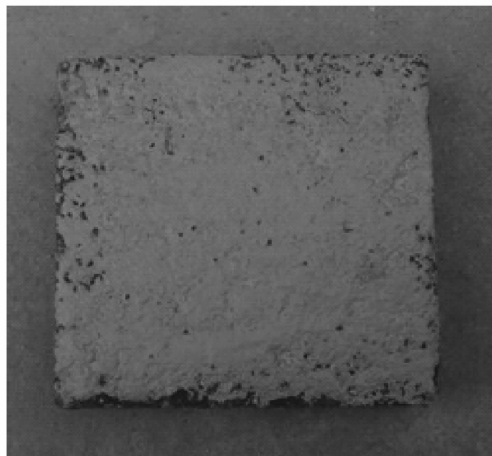


图 5 试件内部降温极限
Fig. 5 Specimen internal cooling limit
白色热反射涂层理论上虽然降温效果最好,但

是却极易引起道路眩光以及使得标志标线难以辨识,根据以往道路的实际使用经验,目前灰色为最适合的道路涂装颜色。后续试验采用了在钛白粉中加入 25% 的某种黑色颜料,将反射涂层调制接近水泥路面的颜色,见图 6。与白色涂层相比,灰色涂层在相同条件下的温度上限为 48.0°C ,降温性能降低了约 10°C ,但与对比试件相比,其温度依旧能降低 12°C ,效果依旧明显。



(a) 白色试件



(b) 灰色试件

图 6 白色和灰色试件

Fig. 6 White and grey specimens

3.2.2 热反射涂层厚度对降温性能的影响

路用热反射涂层厚度越厚降温效果越好,但到一定厚度后效果会趋于稳定,并且势必会增加工程造价,反之,涂层很薄又起不到预期的降温效果。实际使用中如何在建设成本与降温效果中找到一个平衡点是一个有待研究的现实问题。

本试验选取涂刷量依次为 0.3 、 0.6 、 $0.9\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的三档灰色涂层进行降温测试,对比未涂刷试件的温度,从中选取一个最佳的用量。试件表面升温曲线见图 7,试件内部升温曲线见图 8。

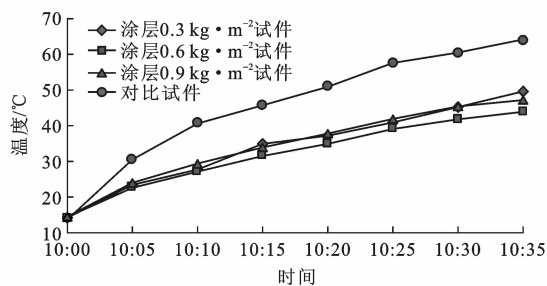


图 7 试件表面升温曲线

Fig. 7 Specimen surface temperature curves

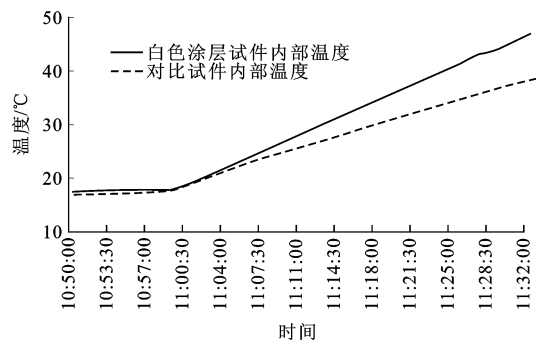


图 8 试件内部升温曲线

Fig. 8 Specimen internal temperature curves

从图 7、8 可以看出:不同涂刷量对试件表面降温均有显著效果,与对比试件相比,辐照刚开始温度就区别明显,并随时间温差累积越大,辐照结束时最大温差达到了 20.3°C ;不同涂刷量对表面降温的区分度较小,相同时间节点内温差约为 3°C ,其中 $0.6\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的效果最佳,表面降温效果并非随厚度增加而增强;不同涂刷量对试件内部降温均有明显效果,与对比试件的温差最大有 18.2°C ,但区分度较表面温度有所增大, $0.3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的效果稍次, 0.6 、 $0.9\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的内部降温效果相差不大,综合考虑降温效果和造价两方面因素,推荐选取的涂刷量为 $0.6\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

4 抗滑性能研究

4.1 热反射涂层抗滑性能的测试与评价

沥青路面原本具有良好的抗滑性能,在涂布热反射涂层后会改变原有的路表纹理并减小表面构造深度,此时,涂层的抗滑性能能否保证安全行车的需要是热反射涂层得以在路面应用的根本前提。

中国现行《公路路基路面现场测试规程》(JTG E60—2008)规定横向力系数法、构造深度测试法和摆式仪法为沥青路面抗滑性能的测试方法,抗滑性能对于高速、一级公路要求横向力系数不小于 50,摆值不小于 42 BPN,构造深度不小于 0.50 mm 。

上述方法中,涂层会降低路表的构造深度,显然构造深度测试法不适于测试热反射涂层的抗滑性能。对于室内试验,由于试件尺寸较小(30 cm×30 cm),横向力系数法无法施用,因而本文采用摆式摩擦仪测试评价其抗滑性能。

采用摆式摩擦仪分别对室内涂刷不同厚度反射涂层的试件进行了测定,3种工况对应涂刷量分别为0.3、0.6、0.9 kg·m⁻²,测试结果见图9。

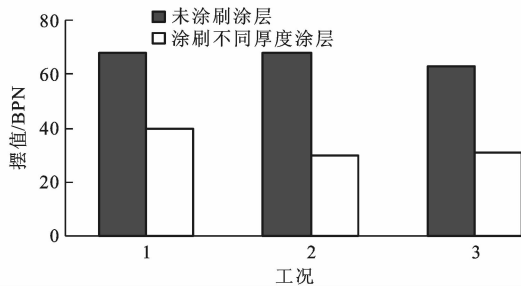


图9 摆值对比

Fig. 9 BPN contrast

从图9中可以看出,涂刷量为0.3 kg·m⁻²的试件摆值最高,为40 BPN,涂刷量为0.6、0.9 kg·m⁻²的试件摆值基本相同,但均低于规范要求,其主要原因是试件表面为溶剂型涂层,表面漆膜在有水膜的情况下抗滑性能较差,0.3 kg·m⁻²的涂布量在试件表面成膜很薄,试件表面还有一定的构造深度和集料表面纹理,所以高于其余2种涂刷量的摆值。综上,要扩大热反射涂层的使用范围,就必须通过技术措施改善其表面抗滑性能。

4.2 热反射涂层抗滑性能的改善

防滑涂料中往往采用防滑颗粒来改善抗滑不足的问题,并且效果明显,本文借鉴防滑涂料的成功经验,采用在热反射涂料中添加防滑颗粒的方式来改善抗滑性能。目前常用的防滑粒料根据颗粒强度可以分为软、硬两类,第一类为合成有机材料(软质),包括各种高聚树脂颗粒、聚乙烯、聚氯乙烯、天然橡胶颗粒等惰性高分子材料;第二类为无机物(硬质),分为金刚砂、玻璃珠、石英砂、云母、天然砂等,硬质颗粒不仅能提高水湿态和油润态下的摩擦阻力,也能显著增加防滑涂料的干态摩擦因数^[15]。

本次试验采用粒径为0.5~1.0 mm的石灰岩作为防滑颗粒。首先涂刷一层热反射涂料作为底漆,然后按160 kg·m⁻²用量撒布防滑颗粒,待底漆与颗粒固结后再涂刷一层热反射涂料裹覆颗粒,最后测定其摆值。防滑颗粒所用细集料性质见表4,试件摆值情况见图10。

从图10可以看出,3种不同厚度涂层添加防滑

表4 防滑颗粒的性能指标

Tab. 4 Performance indexes of antiskid particles

试验项	试验结果	技术要求	试验方法
石料压碎值/%	15.5	≤28	T0316—2005
洛杉矶磨耗值/%	16.3	≤30	T0317—2000
坚固性/%	8	≤12	T0314—2000
表观相对密度	2.694 2	实测	T0328—2005
含泥量/%	1	≤3	T0333—2000

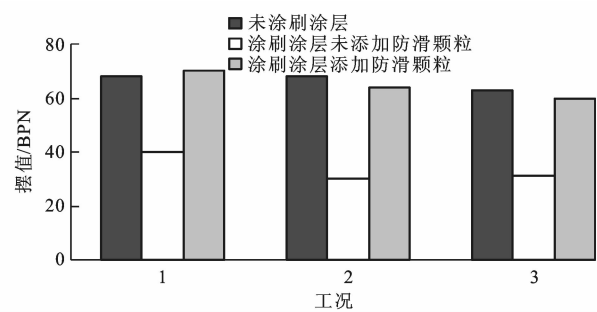


图10 添加防滑颗粒后的试件摆值

Fig. 10 Specimen BPNs after spreading antiskid particles

颗粒后摆值均有大幅度的提升,与未涂刷的普通沥青混合料试件表面的抗滑摆值相当。由此可见,撒布防滑颗粒后增大了路面的构造深度,涂层表面的抗滑性能完全满足行车安全的要求。

4.3 防滑颗粒对降温效果的影响

热反射涂层添加防滑颗粒后是否会影响涂层的降温效果是一个首要关心的问题,为此对撒布防滑颗粒的试件进行了室内试验,分别测试了对比试件、纯净涂层试件与添加防滑颗粒涂层试件的降温效果,见图11。

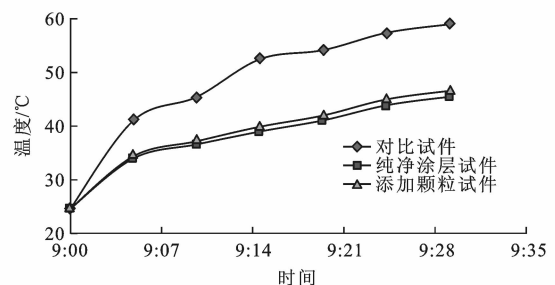


图11 添加防滑颗粒后试件降温效果

Fig. 11 Cooling effects of specimens after spreading antiskid particles

从图11可以看出,添加防滑颗粒的热反射涂层降温效果与未添加防滑颗粒的涂层效果相差无几,接受辐射30 min后,两者温度仅相差1.1℃,而与对比试件相差达到了10℃以上,降温效果依旧显著。可见,添加防滑颗粒的热反射涂层对降温效果的影响可以忽略不计,并且添加防滑颗粒后可以减

小涂层的光泽和亮度,配合灰色的涂层颜色可减少道路的光污染^[16],极大提高行车的安全性。

5 结 语

(1)自主研发了热反射型沥青路面综合测试装置,测试了太阳热反射涂层试件和对比试件的温度值,结果表明涂层可以起到理想的降温效果,白色涂层的表面降温极限可达 $18\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$,在试件内部 2.5 cm 处可降低 $9.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,灰色涂层表面可降低 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2)通过对比不同涂层厚度下试件的温度值得出,反射涂层的降温能力随厚度的增大而增大,但达到一定厚度后,降温效果趋于恒定。综合考虑造价和降温效果,推荐的最佳用量为 $0.6\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

(3)通过对沥青路面上太阳热反射涂层的抗滑性能评价发现,涂刷涂层后,路表的抗滑性大幅降低,由于溶剂型涂层表面漆膜在有水膜的情况下抗滑性能较差,需要添加防滑颗粒。添加防滑颗粒后的路面抗滑性能恢复如初,有利于行车安全,且不降低涂层降温效果。

参 考 文 献 :

References :

- [1] ROSENFELD A H, AKBARI H, BRETZ S, et al. Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates[J]. Energy and Buildings, 1995, 22(3): 255-265.
- [2] 赵延庆,黄大喜. 沥青混合料破坏阶段的黏弹性行为[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 25-28.
ZHAO Yan-qing, HUANG Da-xi. Viscoelastic behavior of asphalt mixtures with damage stage[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 25-28. (in Chinese)
- [3] 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.
CHENG Cheng. Preparation and performance evaluation of solar heat reflective coating on asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [4] 田卫群,周 彬,丛 菱,等. 改性沥青混合料高温性能及其评价方法[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(3): 285-287, 291.
TIAN Wei-qun, ZHOU Bin, CONG Ling, et al. High temperature stability of modified asphalt mixture and its evaluation method[J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(3): 285-287, 291. (in Chinese)
- [5] YANG Jun, YU Liang-ming, WAN Jun, et al. Rutting resistance of asphalt mixtures in the middle course[J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2006, 22(2): 270-272.
- [6] SIRIN O, KIM H J, TIA M, et al. Comparison of rutting resistance of unmodified and SBS-modified Superpave mixtures by accelerated pavement testing[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(3): 286-294.
- [7] 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]. 水科学与工程学报, 2005(增): 37-39.
ZHANG Hong-qing, SONG Zhi-bin, YANG Qing, et al. Analysis and research of the improvement of the urban ecological environment caused by the permeable pavement[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2005(S): 37-39. (in Chinese)
- [8] HERMANSSON A. Simulation model for calculating pavement temperatures including maximum temperature[J]. Transportation Research Record, 2000(1699): 134-141.
- [9] 王 伟. 沥青路面太阳热反射涂层性能及应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
WANG Wei. Research on performance and application of heat-reflective coating for asphalt pavement[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [10] DOULOS L, SANTAMOURIS M, LIVADA I. Passive cooling of outdoor urban spaces—the role of materials[J]. Solar Energy, 2004, 77(2): 231-249.
- [11] 徐 峰. 反射型建筑保温隔热涂料的应用与发展[J]. 现代涂料与涂装, 2007, 10(1): 20-24.
XU Feng. Application and development of reflective thermal insulating coatings for architectural[J]. Modern Paint and Finishing, 2007, 10(1): 20-24. (in Chinese)
- [12] 王科林,徐 娜. 太阳热反射隔热涂层及其发展趋势[J]. 现代涂料与涂装, 2009, 12(2): 18-22.
WANG Ke-lin, XU Na. Solar-reflective heat-insulating coating and its development[J]. Modern Paint and Finishing, 2009, 12(2): 18-22. (in Chinese)
- [13] 徐永祥,李运德,师 华,等. 太阳热反射隔热涂料研究进展[J]. 涂料工业, 2010, 40(1): 70-74.
XU Yong-xiang, LI Yun-de, SHI Hua, et al. Present situation and progress of solar heat reflective thermal insulating coatings[J]. Paint and Coatings Industry, 2010, 40(1): 70-74. (in Chinese)
- [14] 梁满杰. 沥青路面光热效应机理及热反射涂层技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
LIANG Man-jie. Asphalt pavement light thermal reaction mechanism and heat-reflection coating engineering research[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
- [15] 朱万章. 摩擦与防滑涂料[J]. 涂料工业, 2002, 32(8): 34-37.
ZHU Wan-zhang. Friction and anti-slip coatings[J]. Paint and Coatings Industry, 2002, 32(8): 34-37. (in Chinese)
- [16] CHALKIAS C, PETRAKIS M, PSILOGLOU B, et al. Modelling of light pollution in suburban areas using remotely sensed imagery and GIS[J]. Journal of Environmental Management, 2006, 79(1): 57-63.