

文章编号:1671-8879(2016)04-0018-08

负重轮碾压的路用降温涂层高温稳定性能

孙晓龙¹,王朝辉¹,张洪华²,高志伟³,刘相儒⁴

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 中交公路养护工程技术有限公司,北京 100080; 3. 西藏民族大学 信息工程学院,陕西 咸阳 712082; 4. 河北冀通路桥建设有限公司,河北 石家庄 050000)

摘要:针对现有沥青路面降温涂层高温稳定性能评价方法尚不完善的问题,优选降温功能性材料、涂层粘结材料、颜料、辅助材料及助剂等一系列沥青路面降温涂层原材料,制备了多种新型沥青路面降温涂层,借助室外降温效果试验,全面评价了路用降温涂层的室外降温效果;基于负荷轮碾压试验,系统研究了不同温度及保温时间条件下路用降温涂层的高温稳定性,确定了路用降温涂层的适用温度上限及高温区划适用性,并在此基础上,对比分析了路用降温涂层涂刷前后车辙板试件动稳定度变化,深入研究了路用降温涂层对沥青路面高温稳定性能的影响规律。研究表明:在室外环境条件影响下,不同类型沥青路面降温涂层能够显著降低沥青路面温度,降温幅度基本保持在 5 ℃ 以上,而当路面温度达到 60 ℃ 时,降温幅度最高可达 11 ℃;在高温条件下,不同类型路用降温涂层均具有良好的适用温度上限和高温适用性,其中,适用温度上限最高可达 70 ℃ 以上,能够分别满足夏炎区、夏炎热区等不同高温区划地区的相应使用需求;路用降温涂层的应用能够显著增大沥青混凝土试件的动稳定度,大幅提高了沥青路面的高温性能;在水荷耦合作用下,路用降温涂层均能够保持良好的表面状况和整体性,为路用降温涂层的推广和应用奠定了坚实的基础。

关键词:道路工程;降温涂层;负重轮碾压试验;高温稳定性;降温性能

中图分类号:U411 文献标志码:A

High temperature stability performance of asphalt road cooling coatings based on road wheel tracking test

SUN Xiao-long¹, WANG Chao-hui¹, ZHANG Hong-hua², GAO Zhi-wei³, LIU Xiang-ru⁴

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China, 2. CCCC Highway Maintenance Engineering Technology Co. Ltd., Beijing 100080, China; 3. College of Information Engineering, Xizang Minzu University, Xianyang 712082, Shaanxi, China; 4. Hebei Jitong Road & Bridge Construction Co. Ltd., Shijiazhuang 050000, Hebei, China)

Abstract: The high temperature stability evaluation method of road cooling coating has not yet formed now. A variety of raw materials, such as cooling functional materials, adhesive material, pigment, auxiliary materials and adjuvant were selected and different kinds of road cooling coatings for asphalt pavement were prepared. The cooling performances of road cooling coatings were evaluated comprehensively through field test. Based on road wheel tracking test, the high temperature stability of road cooling coatings were evaluated comprehensively. The applicable

收稿日期:2016-01-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51208045);交通运输部建设科技项目(201331849A270);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2014JM2-5045);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821162013)

作者简介:孙晓龙(1988-),男,山东高密人,工学博士研究生,E-mail:AlvesEdison@163.com。

temperature limit and applicability of high temperature zoning were determined. By comparative analysis of road cooling coating brush specimens before and after dynamic stability changes, the influence of road cooling coating on high temperature stability of asphalt pavement was studied. The results show that different types of road cooling coatings can reduce the temperature of asphalt pavement temperature above 5 °C under the impact of outside environment. When the temperature is over 60 °C, the cooling effect is up to a maximum of 11 °C. Under the condition of high temperature, different types of road cooling coatings have good high temperature stability and the application temperature limit can reach to 70 °C, which meet the needs of different temperature areas. The application of road cooling coatings can significantly increase the dynamic stability of asphalt pavement, which can improve the high temperature stability of asphalt pavement. Under the coupling effect of water and load, the pavement cooling coating can keep good surface condition and integrity. This paper lays a solid foundation for the popularization and application of road cooling coating. 10 tabs, 2 figs, 21 refs.

Key words: road engineering; cool road coating; road wheel rolling test; high temperature stability; cooling performance

0 引言

路用降温涂层作为最有效的沥青路面降温手段,能够显著降低沥青路面的温度,缓解沥青路面的高温病害^[1]。国内外研究机构已对路用降温涂层开展了深入的研究,并取得了一定的研究成果。冯德成等对自主开发的路用热反射涂层材料抗滑性能进行了研究,确定了抗滑性能的衰变机理^[2]; Santamouris 等对降温材料在城市建设中的应用效果及各项性能展开了全面的研究^[3];郑木莲等采用摆式仪研究了路用降温涂层涂抹量对沥青路面抗滑性能的影响^[4];Guntor 等针对特殊地区全面研究了降温涂层材料的基本性能及降温功效^[5];凌天清等对保水降温路面材料的各项性能进行了全面的研究^[6];Karlessi 等开发并测试了针对城市建筑结构的热反射涂层材料^[7];曹雪娟等对热反射涂层的路用性能进行了系统的研究和评价^[8];黄文红等对太阳反射涂层的干燥时间和抗滑性能进行了系统研究^[9];Synnefa 等研发并评价了新型降温材料在城市建筑及基础设施中的应用效果^[10];文旭卿等对热反射涂层的封水性能进行了研究,确定了热反射涂层对沥青路面渗水系数的影响规律^[11];李文珍等以耐磨性、耐水性、耐汽油性、柔韧性、耐候性等指标为主,对热反射涂层的耐久性进行了全面研究^[12];Karlessi 等系统研究了降温材料对于城市热岛效应及道路性能的影响规律^[13-14];Levinson 等对非白色降温涂层材料的各项性能进行了全面的研究^[15]。由此可见,现有的路用降温涂层研究多针对其降温性能、抗

滑性能、耐久性能等,尚未对路用降温涂层的高温稳定性和高温区划适用性展开相关研究。路用降温涂层的高温稳定性作为重要的路用性能指标,对于其自身的降温性能和耐久性能具有重要的意义。同时,路用降温涂层的高温稳定性还会对沥青路面的路用性能和使用寿命产生重要影响。较差的高温性能不但会削弱路用降温涂层自身的降温性能,缩短其使用寿命,而且还会对沥青路面的路用性能产生不利影响,严重时会造成沥青路面早期病害,缩短路面使用寿命。综上所述,提出完备的路用降温涂层高温稳定性评价方法对于现有路用降温涂层的高温性能评价具有重要的意义。

为此,本文优选了一系列降温涂层原材料,并制备了多种新型沥青路面降温涂层材料;基于负荷轮碾压试验,全面评价了路用降温涂层的高温稳定性,确定了路用降温涂层的适用温度上限;系统研究了不同温度条件下路用降温涂层的保温时间上限,确定不同高温区划条件下路用降温涂层的适用性;通过对比分析涂刷路用降温涂层前后车辙板试件动稳定度变化,系统研究了路用降温涂层对沥青路面高温稳定性的影响规律,为路用降温涂层在中国的推广和应用奠定坚实的基础。

1 路用降温涂层材料制备

1.1 路用降温涂层原材料

1.1.1 降温功能性材料

基于电荷迁移原理,以及现有降温材料的特点,优选了2种性能优良的降温功能性材料A粉、B粉

进行沥青路面降温涂层制备,C粉为辅助材料。降温功能性材料的物化性能见表1。

表1 降温功能性材料基本指标

Tab. 1 Basic indicators of cooling functional materials

降温功能性材料	颜色	密度/(g·cm ⁻³)	热电系数/(μV·℃ ⁻¹)
A粉	褐色	4.92	530~496
B粉	黑色	5.06	602~681
C粉	白色	3.06	

1.1.2 辅助原材料

降温涂层载体材料主要采用环氧树脂及聚酰胺树脂,同时采用工业乙醇作为助剂对二者进行溶解(乙醇材料无毒无害,能够提高树脂材料韧性)^[16-17];采用陶土作为主要颜料调节降温涂层色泽;为了保证该降温涂层的降温效果,还选择折光效果优良的氧化铁作为辅助降温材料提高路用降温涂层降温效果。

1.2 路用降温涂层配方设计与制备

采用优选的降温功能性材料复配成5种配方:A、B、C、A1、B1,其中A1和B1为A与C、B与C分别以1:1的质量比例复配而成,而降温功能性材料掺量为涂层载体质量的20%。将5种配方降温功能性材料分别与其他原材料混合,借助搅拌装置制备成5种新型路用降温涂层。

2 路用降温涂层降温性能研究

依据相关试验规程,采用SBS改性沥青及玄武岩集料成型级配为AC-13的车辙板试件,在制备车辙板试件过程中,分别在车辙板的表面、中部及下部预埋温度传感器^[18-21]。试件制备完成后,将制备好的路用降温涂层按照涂抹量0.8 kg/m²均匀涂抹于车辙板试件表面,并放于通风处干燥24 h。

将制备好的降温涂层试件放置于室外太阳直射环境中,采用粘土对车辙板试件侧面及底面进行封闭性包裹,起到防止热散失的效果,保证降温性能测试结果准确性。在夏季晴天条件下,从上午10:00至下午15:00每0.5 h对试件不同位置处温度值进行记录,确定其降温性能。不同类型沥青路面降温涂层的降温效果如图1所示。图中, t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 分别为45℃、50℃、55℃、60℃,为未涂刷降温涂层车辙板表面温度; T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 分别为31.9℃、33.1℃、35.5℃、37.8℃,为大气温度。

由图1分析可知,路用降温涂层能够显著降低沥青路面温度,而且降温效果随沥青混凝土温度的升高而逐渐增大。其中,A1、B1及C降温涂层降温

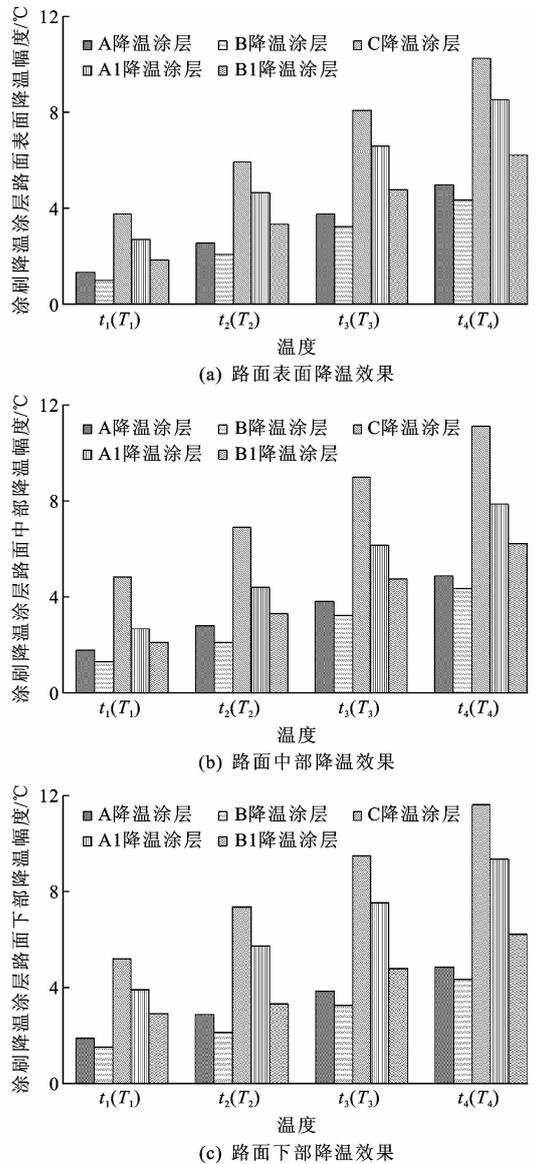


图1 不同类型路用降温涂层降温效果

Fig. 1 Cooling effect of different road cooling coatings

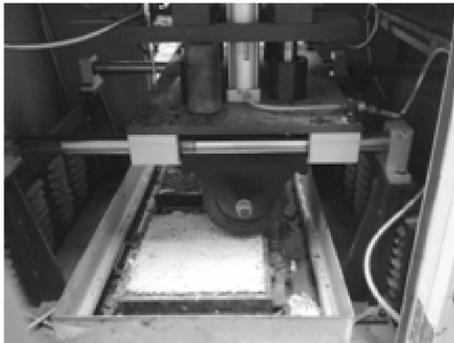
效果最优,当试件温度达到60℃时,降温效果最高可达到11℃以上,而A和B降温涂层降温效果也能够达到5℃以上,这表明不同类型的路用降温涂层对于沥青路面具有显著降温效果,能够缓解沥青路面在夏季高温条件下的车辙病害问题。

3 路用降温涂层高温稳定性研究

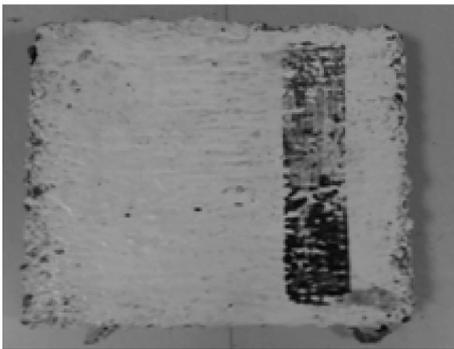
3.1 路用降温涂层适用温度上限确定

将试验温度划分为30℃、40℃、50℃、60℃和70℃这5个温度水平,分别按照《沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)中车辙试验方法进行试验,当涂层表面出现明显的车辙痕迹及粘轮现象时,在相应表格对应处画X,未出现该类现象时画O。待确定了具体使用温度范围后,再将温度范围

细化,以 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为区间间隔进行细化,以确定更加精确的降温涂层适用温度限值。负重轮碾压后涂层表面状况如图2所示。不同温度条件下路用降温涂层表面状况评价结果见表2。



(a) 负重轮碾压试验



(b) 负重轮碾压后涂层表面状况

图2 负重轮碾压试验及降温涂层表面状况

Fig. 2 Loading wheel rolling test and cooling coating surface condition

表2 不同温度条件下降温涂层表面状况评价结果

Tab. 2 Evaluation results of cooling coating surface condition under different temperature conditions

降温涂层 类型	涂抹量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	保温温度/ $^{\circ}\text{C}$				
		30	40	50	60	70
A 降温涂层	0.8	O	O	O	X	X
B 降温涂层	0.8	O	O	O	X	X
C 降温涂层	0.8	O	O	O	O	X
A1 降温涂层	0.8	O	O	O	O	X
B1 降温涂层	0.8	O	O	O	O	X

根据表2分析可知,对于A和B降温涂层,适用温度上限位于 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间;而对于C、A1和B1降温涂层,适用温度上限位于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。因此,对于A和B降温涂层,将适用温度确定范围设定在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$,将该温度区间划分为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $54\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $56\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $58\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区间;而对于C、A1和B1降温涂层,适用温度范围初步定在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,将该温度区间划分为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $62\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $64\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $66\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $68\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区间,并分别进行车

辙试验。路用降温涂层适用温度上限试验结果如表3所示。

表3 不同类型路用降温涂层适用温度上限确定试验结果

Tab. 3 Experimental results of suitable temperature upper limit value range of road cooling coatings

降温涂层 类型	涂抹量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	保温温度/ $^{\circ}\text{C}$					
		50	52	54	56	58	60
A 降温涂层	0.8	O	O	O	O	X	X
B 降温涂层	0.8	O	O	O	O	X	X
降温涂层 类型	涂抹量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	保温温度/ $^{\circ}\text{C}$					
		60	62	64	66	68	70
C 降温涂层	0.8	O	O	O	X	X	X
A1 降温涂层	0.8	O	O	O	O	X	X
B1 降温涂层	0.8	O	O	O	O	X	X

由表3分析可知,在 $56\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的使用温度条件下进行车辙试验后,A和B降温涂层表面状况都能够保持良好的状态,当温度达到 $58\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,A和B降温涂层开始出现不良的表面状况。因此,综合考虑降温涂层的使用环境和性能,将A和B降温涂层的适用温度上限定为 $56\text{ }^{\circ}\text{C}$;而对于C、A1和B1降温涂层,适用温度上限较高,其中C降温涂层的适用温度上限为 $64\text{ }^{\circ}\text{C}$,A1和B1降温涂层温度适用上限为 $66\text{ }^{\circ}\text{C}$,这表明C、A1和B1的高温稳定性相对于A和B降温涂层更优,更适宜在夏季高温地区使用。

3.2 路用降温涂层的高温区划适用性研究

将试验温度划分为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以及 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 这5个温度水平,首先基于适用温度上限选定试验保温温度,然后将10h选定为初始保温时间,保温时间以2h为间隔,在初始保温时间条件下,对涂有路用降温涂层的车辙板进行车辙试验,若在初始保温时间出现明显的车辙痕迹和粘轮现象,则减少保温时间继续进行试验,直到车辙板表面状况良好为止;若在初始保温时间内未出现任何表面破坏,则表明在该温度下路用涂层不会出现高温病害。对于不同类型路用降温涂层的气候区划适应性试验结果见表4、下页表5~表7。

表4 不同类型路用降温涂层气候区划适应性试验结果($70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水平)

Tab. 4 Experimental results of suitable temperature upper limit value of road cooling coatings ($70\text{ }^{\circ}\text{C}$ level)

降温涂层 类型	涂抹量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	$70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水平不同保温时间的试验结果/h				
		10	8	6	4	2
C 降温涂层	0.8	X	X	X	O	O
A1 降温涂层	0.8	X	O	O	O	O
B1 降温涂层	0.8	X	O	O	O	O

根据表4~表7分析可知,对于A和B降温涂层,在60℃保温条件下,当保温时间大于6h时涂层表面出现了明显的车辙破坏,而当保温时间在4h内,A和B降温涂层才能够保证良好的表面状况;在50℃条件下,能够在8h保温时间内保证良好的表面状况;在40℃条件下,10h保温时间内,均能够保证良好的表面状况;而对于C降温涂层,在70℃初始温度条件下,在10、8、6h的保温时间内均出现了明显的车辙破坏,而在4h左右才能够保证良好的表面状况;对于A1和B1降温涂层,仅在10h的保温时间内均出现了明显的车辙破坏,其他保温时间条件下表面状况良好。不同类型路用降温涂层的高温区划适用性如表8所示。

表5 不同类型路用降温涂层气候区划适应性试验结果(60℃水平)

Tab.5 Experimental results of suitable temperature upper limit value of road cooling coatings (60℃ level)

降温涂层类型	涂抹量/(kg·m ⁻²)	60℃水平不同保温时间的试验结果/h				
		10	8	6	4	2
A降温涂层	0.8	X	X	X	O	O
B降温涂层	0.8	X	X	X	O	O
C降温涂层	0.8	X	O	O	O	O
A1降温涂层	0.8	O	O	O	O	O
B1降温涂层	0.8	O	O	O	O	O

表6 不同类型路用降温涂层气候区划适应性试验结果(50℃水平)

Tab.6 Experimental results of suitable temperature upper limit value of road cooling coatings (50℃ level)

降温涂层类型	涂抹量/(kg·m ⁻²)	50℃水平不同保温时间的试验结果/h				
		10	8	6	4	2
A降温涂层	0.8	X	O	O	O	O
B降温涂层	0.8	X	O	O	O	O
C降温涂层	0.8	O	O	O	O	O
A1降温涂层	0.8	O	O	O	O	O
B1降温涂层	0.8	O	O	O	O	O

表7 不同类型路用降温涂层气候区划适应性试验结果(40℃水平)

Tab.6 Experimental results of suitable temperature upper limit value of road cooling coatings (40℃ level)

降温涂层类型	涂抹量/(kg·m ⁻²)	40℃水平不同保温时间的试验结果/h				
		10	8	6	4	2
A降温涂层	0.8	O	O	O	O	O
B降温涂层	0.8	O	O	O	O	O

4 路用降温涂层路面高温稳定性研究

4.1 基于荷载作用的高温稳定性研究

根据《沥青及沥青混合料试验规程》(BG E20—2011),采用AC-13级配制备普通车辙板试件,借助

车辙试验分别测试路用降温涂层涂刷前后试件的动稳定度变化,确定路用降温涂层对沥青路面高温性能的影响规律。

表8 不同类型路用降温涂层的高温区划适用性

Tab.8 Applicability of high temperature zoning of different road cooling coatings

降温涂层类型	路用降温涂层保温时间上限	高温区划适用性
A降温涂层	在夏季路面高温持续时间(60℃)4h以内可正常使用; 在夏季路面高温持续时间(50℃)8h以内可正常使用	夏炎区、夏凉区
B降温涂层	在夏季路面高温持续时间(60℃)4h以内可正常使用; 在夏季路面高温持续时间(50℃)8h以内可正常使用	夏炎区、夏凉区
C降温涂层	在夏季路面高温持续时间(60℃)8h以内可正常使用; 在夏季路面高温持续时间(50℃)10h以内可正常使用	夏炎区、夏凉区、 夏炎热区
A1降温涂层	在夏季路面高温持续时间(60℃)8h以内可正常使用; 在夏季路面高温持续时间(50℃)10h以内可正常使用	夏炎区、夏凉区、 夏炎热区
B1降温涂层	在夏季路面高温持续时间(60℃)在8h以内可正常使用; 在夏季路面高温持续时间(50℃)在10h以内可正常使用	夏炎区、夏凉区、 夏炎热区

借助车辙仪对试件涂刷降温涂层前后的动稳定度进行采集,研究降温涂层对沥青路面高温稳定性的影响规律。高温稳定性试验结果如下页表9所示。

由表9分析可知,在车辙板表面涂刷路用降温涂层后,车辙板的动稳定度均有不同程度的提高。当涂抹量由0.6kg/m²增加到0.8kg/m²时,动稳定度的增长幅度显著;而当涂抹量由0.8kg/m²增长到1.0kg/m²时,动稳定度的增长幅度有一定的下降,这可能是在负荷车轮的碾压作用下,由于涂抹量的增加使涂膜总体厚度变大,车辙板对涂层的荷载分担作用减小,降温涂层承担了更多的车路荷载作用,同时,降温涂层厚度的增大使试件的整体车辙深度变大,从而导致动稳定度的增长幅度减小。

相对于未涂刷涂层的车辙板,当涂抹量为0.8kg/m²时,A降温涂层的动稳定度提高了36.6%,B降温涂层的动稳定度提高了47.9%,C降温涂层的动稳定度提高了18.8%,A1降温涂层动稳定度提高了65.0%,B1降温涂层动稳定度提高了60.4%。这

表 9 标准轴载作用下不同类型路用降温涂层高温稳定性试验结果

Tab. 9 Test results of high temperature stability of different road cooling coatings under standard axle load

降温涂层类型	涂抹量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	动稳定度/(次· mm^{-1})		增长幅度/%
		涂刷前	涂刷后	
A 降温涂层	0.6	3 300	4 235	28.3
	0.8	3 850	5 260	36.6
	1.0	5 469	6 652	21.6
B 降温涂层	0.6	4 100	5 300	29.3
	0.8	4 360	6 450	47.9
	1.0	6 347	8 100	27.6
C 降温涂层	0.6	4 980	5 654	13.5
	0.8	4 413	5 243	18.8
	1.0	3 679	4 210	14.4
A1 降温涂层	0.6	3 957	5 335	34.8
	0.8	4 230	6 980	65.0
	1.0	3 835	4 913	28.1
B1 降温涂层	0.6	4 536	5 670	25.0
	0.8	4 270	6 850	60.4
	1.0	4 438	6 130	38.1
规范要求 (JTG F40—2004)		$\geq 2 800$		

表明路用降温涂层的涂刷可以使动稳定度显著提高,增强了沥青路面的高温稳定性。路用降温涂层对于沥青路面高温性能的改善作用机理主要有以下两方面。

(1)路用降温涂层具有良好的降温功效,在外界高温条件下,能够大幅度降低沥青路面工作温度,改善沥青路面的工作状况,提高了沥青路面动稳定度,从而能使沥青路面在高温环境条件下保持良好的高温稳定性。

(2)路用降温涂层自身具有一定的强度,在轮载作用下与路面形成整体受力体系,通过自身的强度分担了一定的车辆荷载作用,在一定程度上减少了作用在路面上的直接荷载,减小了车辙深度,从而提高了路面的动稳定度。

4.2 基于水荷耦合作用的高温稳定性研究

为确定在应用环境中水和车辆荷载共同作用下路用降温涂层高温稳定性的变化规律,采用 AC-13 级配制普通车辙板试件,并涂刷路用降温涂层。待降温涂层完全干燥后,首先将试件放置于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水浴箱内保温 12 h,然后将试件取出后放入车辙仪内,在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境中以标准轴载碾压 1 h,观察试件表面状况,并记录试件动稳定度,确定水荷耦合作用下路用降温涂层对沥青路面高温性能的影响规律。根

据上节相关研究成果,主要在 0.8 kg/m^2 涂抹量条件下进行试验。水荷耦合作用下高温稳定性试验结果如表 10 所示。

表 10 水荷耦合作用下不同类型路用降温涂层高温稳定性试验结果

Tab. 10 Test results of high temperature stability of different road cooling coatings under water and axle load

降温涂层类型	动稳定度/(次· mm^{-1})		增长幅度/%	表面状况
	涂刷前	涂刷并进行试验后		
A 降温涂层	2 930	3 820	30.4	良好,未出现裂缝、剥落、碎裂等病害
B 降温涂层	3 985	5 211	30.8	良好,未出现裂缝、剥落、碎裂等病害
C 降温涂层	3 159	4 080	29.2	良好,未出现裂缝、剥落、碎裂等病害
A1 降温涂层	3 971	5 421	36.5	良好,未出现裂缝、剥落、碎裂等病害
B1 降温涂层	3 724	4 995	34.1	良好,未出现裂缝、剥落、碎裂等病害
规范要求 (JTG F40—2004)	$\geq 2 800$			

由表 10 分析可知,在对路用降温涂层进行 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴保温 12 h 及标准轴载碾压后,试件表面状况良好,并未出现裂痕、剥落、碎裂等破坏,而且碾压车辙印痕处降温涂层与未碾压处降温涂层未出现分离,仍然保持为同一整体。这表明高温条件下,在外界水和荷载的共同作用下,路用降温涂层仍然能保持良好的表面状况和整体性,能够抵御车辆荷载的不利影响;同时,在水荷耦合作用下,路用降温涂层试件的动稳定度仍然保持增长趋势,增长幅度均在 20% 以上,而且动稳定度均在 3 800 次/mm 以上,满足规范的限值要求。这可能是由于降温涂层具有良好的封水性能,能够阻止外界水进入路面内部,减少了外界水对沥青路面高温稳定性的不良影响,从而在外界水的不良影响下为沥青路面的高温性能提供保障。

5 结 语

(1)选定 A 粉、B 粉和 C 粉作为降温功能性材料,涂层载体材料主要采用环氧树脂及聚酰胺树脂,同时采用工业乙醇作为助剂对二者进行溶解;采用陶土作为主要颜料调节降温涂层色泽,选择折光效果优良的氧化铁作为辅助降温材料提高路用降温涂层降温效果。

(2)在室外真实应用环境下,A1、B1 和 C 降温

涂层降温效果最高可达 11 ℃,而 A 和 B 降温涂层降温效果也保持在 5 ℃以上。

(3)A 和 B 降温涂层的适用温度上限为 56 ℃,C 降温涂层的适用温度上限为 64 ℃,而 A1 和 B1 降温涂层适用温度上限为 66 ℃;C、A1 和 B1 降温涂层的高温稳定性相对更佳,适宜在夏季高温地区使用。

(4)A 和 B 降温涂层在夏季路面高温持续时间(60 ℃)在 4 h 以内条件下可正常使用,适宜在夏炎区和夏凉区使用;C、A1 和 B1 降温涂层在夏季路面高温持续时间(60 ℃)在 8 h 以内可正常使用,在夏炎区、夏凉区、夏炎热区均可正常使用。

(5)当涂抹量由 0.6 kg/m² 增加到 0.8 kg/m² 时,试件动稳定度的增长幅度显著;当涂抹量由 0.8 kg/m² 增长到 1.0 kg/m² 时,动稳定度的增长幅度有一定的下降;相对于未涂刷涂层的车辙板,A 降温涂层的动稳定度提高了 36.6%,B 降温涂层的动稳定度提高了 47.9%,C 降温涂层的动稳定度提高了 18.8%,A1 降温涂层动稳定度提高了 65.0%,B1 降温涂层的动稳定度提高了 60.4%。路用降温涂层的涂刷可以使动稳定度显著提高,显著增强了路面的高温稳定性能。

(6)路用降温涂层具有良好的降温功效,能够大幅度降低沥青路面工作温度,从而能使沥青路面在高温环境条件下保持良好的高温稳定性;路用降温涂层自身具有一定的强度,在轮载作用下与路面形成整体受力体系,通过自身的强度分担了一定的车辆荷载作用,从而提高了路面的动稳定度。

(7)在对路用降温涂层进行 60 ℃水浴保温 12 h 及标准轴载碾压后,试件表面状况良好,并未出现裂痕、剥落、碎裂等破坏,而且碾压车辙印痕处降温涂层与未碾压处降温涂层未出现分离,仍然保持为同一整体;同时,路用降温涂层试件的动稳定度仍然保持增长趋势,增长幅度均在 20% 以上,动稳定度均在 3 800 次/mm 以上,满足规范的限值要求。

(8)本文主要对降温涂层及其路面的高温稳定性进行了全面的研究和评价,并未对降温涂层对于沥青路面高温性能改善效果的作用机理进行相关研究,因此,在后续相关研究中将会对其作用机理展开全面研究。

参考文献:

References:

[1] 王朝辉,王玉飞,任回兴,等. 环保型路面降温涂层的

现状与发展[J]. 筑路机械与施工机械化,2014,31(6):40-46.

WANG Chao-hui, WANG Yu-fei, REN Hui-xing, et al. Status quo and development of environmental heat insulating coating for pavement[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2014, 31(6): 40-46. (in Chinese)

[2] 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.

FENG De-cheng, ZHANG Xin. Development of heat reflection coating and observation of its road performance[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(10): 17-20. (in Chinese)

[3] SANTAMOURIS M, GAITANI N, SPANOU A, et al. Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas: design realization and results of the flisvos project[J]. Building and Environment, 2012, 53:128-136.

[4] 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,2013,13(5):10-16.

ZHENG Mu-lian, HE Li-tao, GAO Xuan, et al. Analysis of heat-reflective coating property for asphalt pavement based on cooling function[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(5): 10-16. (in Chinese)

[5] GUNTOR N A A, DIN M F M, PONRAJ M, et al. Thermal performance of developed coating material as cool pavement material for tropical regions[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(4): 755-760.

[6] 凌天清,郑晓卫,凌濛,等. 保水降温半柔性路面材料性能研究[J]. 中国公路学报,2010,23(2):7-11,17.

LING Tian-qing, ZHENG Xiao-wei, LING Meng, et al. Research on performance of water-retention and temperature-fall semi-flexible pavement material[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(2):7-11,17. (in Chinese)

[7] KARLESSI T, SANTAMOURIS M, APOSTOLAKIS K, et al. Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures[J]. Solar Energy, 2009, 83(4):538-551.

[8] 曹雪娟,唐伯明,朱洪洲. 降低沥青路面温度的热反射涂层性能研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2010,29(3):391-393.

CAO Xue-juan, TANG Bo-ming, ZHU Hong-zhou.

- Study on performance of heat-reflective coat of lowering asphalt pavement temperature [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science*, 2010, 29(3):391-393. (in Chinese)
- [9] 黄文红,王 伟,刘 军,等. 太阳热反射涂层试验路铺筑及性能评价[J]. *重庆交通大学学报:自然科学版*, 2012, 31(5):982-985.
HUANG Wen-hong, WANG Wei, LIU Jun, et al. Construction and performance evaluation of solar heat-reflecting coating test road [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science*, 2012, 31(5):982-985. (in Chinese)
- [10] SYNNEFA A, SANTAMOURIS M, APOSTOLAKIS K. On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment[J]. *Solar Energy*, 2007, 81(4):488-497.
- [11] 文旭卿,徐 霖,解 琴,等. 热反射涂层在排水性沥青混凝土路面中的应用及性能评价[J]. *公路*, 2012(9):19-23.
WEN Xu-qing, XU Lin, XIE Qin, et al. Application and performance evaluation of heat reflection coating on porous asphalt concrete pavement [J]. *Highway*, 2012(9):19-23. (in Chinese)
- [12] 李文珍,李 亮,石 飞,等. 沥青路面不饱和聚酯降温涂料的研制[J]. *重庆交通大学学报:自然科学版*, 2010, 29(6):916-918.
LI Wen-zhen, LI Liang, SHI Fei, et al. Research and development of unsaturated polyester temperature decreasing coatings of asphalt pavement [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science*, 2010, 29(6):916-918. (in Chinese)
- [13] KARLESSI T, SANTAMOURIS M, SYNNEFA A, et al. Development and testing of PCM doped cool colored coatings to mitigate urban heat island and cool buildings[J]. *Building and Environment*, 2011, 46(3):570-576.
- [14] SANTAMOURIS M, SYNNEFA A, KARLESSI T. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions [J]. *Solar Energy*, 2011, 85(12):3085-3102.
- [15] LEVINSON R, AKBARI H, REILLY J C. Cooler tile-roofed buildings with near-infrared-reflective non-white coatings [J]. *Building and Environment*, 2007, 42(7):2591-2605.
- [16] 刘尊建,闻获江. 含氟活性稀释剂对环氧树脂流变性能的影响[J]. *热固性树脂*, 2007, 22(6):22-24.
LIU Zun-jian, WEN Di-jiang. Effect of reactive fluorinated diluent on rheological behavior of epoxy resin [J]. *Thermosetting Resin*, 2007, 22(6):22-24. (in Chinese)
- [17] 刘美华,李 程,刘志勇. 活性稀释剂环氧环己烷对聚酰胺-胺固化环氧树脂体系性能的影响[J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2013, 44(2):520-525.
LIU Mei-hua, LI Cheng, LIU Zhi-yong. Performance of epoxy resin/polyamide-amine curing agent system using epoxy cyclohexene as reactive diluents [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2013, 44(2):520-525. (in Chinese)
- [18] 王朝辉,王玉飞,孙晓龙,等. 基于能量转换的路用降温涂层材料制备与性能[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(8):14-21.
WANG Chao-hui, WANG Yu-fei, SUN Xiao-long, et al. Preparation and properties of road cooling coating material based on energy conversion [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(8):14-21. (in Chinese)
- [19] 王朝辉,李彦伟,杨 露,等. Tourmaline 改性沥青混凝土路面降温性能研究[J]. *功能材料*, 2014, 45(11):11081-11086.
WANG Chao-hui, LI Yan-wei, YANG Lu, et al. Pavement cooling performance of tourmaline modified asphalt concrete [J]. *Journal of Functional Materials*, 2014, 45(11):11081-11086. (in Chinese)
- [20] 王朝辉,李彦伟,李 蕊,等. 低碳多功能电气石改性沥青制备及性能研究[J]. *中国公路学报*, 2013, 26(5):34-41.
WANG Chao-hui, LI Yan-wei, LI Rui, et al. Preparation of low-carbon multi-function tourmaline modified asphalt and its performance evaluation [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2013, 26(5):34-41. (in Chinese)
- [21] 刘立斌,王玉飞,刘相儒,等. 路用降温涂层最佳涂抹量的确定[J]. *筑路机械与施工机械化*, 2015, 32(5):56-59.
LIU Li-bin, WANG Yu-fei, LIU Xiang-ru, et al. Determination of optimal painting amount of pavement cooling coating [J]. *Road Machinery & Construction Mechanization*, 2015, 32(5):56-59. (in Chinese)