

文章编号:1671-8879(2018)01-0017-08

基于多孔属性的环保型路用涂层性能

郭滕滕^{1,2}, 张 廉¹, 王朝辉¹, 王新岐³, 冯 炜³

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 道路结构与材料交通行业重点实验室,
陕西 西安 710064; 3. 天津市市政工程设计研究院, 天津 300051)

摘 要:为降低路面温度、缓解沥青路面车辙病害的同时兼具净化汽车尾气功效以改善道路使用环境,优选多孔属性材料为功能材料,制备了具有降温 and 净化空气功效的 WEPC(环保型多孔涂层)路用涂层,分析功能材料掺量对涂层基本性能的影响规律,借助室内外测温试验全面评价了不同涂刷量下 WEPC 涂层的降温效果。借助空气净化性能试验箱对 WEPC 路用涂层试件在升降温过程中的汽车尾气成分及含量进行了测试,全面评价不同温度下 WEPC 涂层的净化空气效果。通过表面构造深度和抗滑摆值试验、磨耗试验、车辙试验及耐久性试验等确定了 WEPC 涂层的路用性能,采用扫描电镜和红外光谱分析手段研究多孔属性的环保型路用涂层材料的微观结构。结果表明:功能材料掺量(质量分数,下同)为 20% 时 WEPC 涂层具有良好的基本性能;WEPC 涂层具有良好的降低路面温度功效,涂刷量越大降温效果越显著,降温幅度最高可达 10℃,综合 WEPC 涂层基本性能和降温效果,推荐最佳涂刷量为 0.8 kg/m²;WEPC 涂层在不同温度下均具有一定的净化空气功效,升温区间下的净化效果较好,其对 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的净化率可达 40% 以上,CO_x、NO_x 及 SO₂ 的净化率在 25% 左右;WEPC 涂层的抗滑、耐磨耗、高温稳定及耐久性等各项路用性能良好,且均满足相关规范要求;功能型材料能够稳定均匀地分散于涂层材料中,并使涂层材料中出现了一些新的官能团。

关键词:道路工程;涂层;多孔属性;降温;净化空气;路用性能

中图分类号:U414 **文献标志码:**A

Performance of environment-friendly road coating based on porous properties

GUO Teng-teng^{1,2}, ZHANG Lian¹, WANG Chao-hui¹, WANG Xin-qi³, FENG Wei³

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Road Structure and Material of Ministry of Communications, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
3. Tianjin Municipal Engineering Design and Research Institute, Tianjin 300051, China)

Abstract: In order to reduce pavement temperature, alleviate rutting disease of asphalt pavement and purify the vehicle exhaust to improve the environment of road, road coating with cooling and purification effects, named environment-friendly porous coating (WEPC), was prepared with porous materials as the functional materials. The effects of the functional materials' dosage on basic performances of WEPC were analyzed. The cooling effect of WEPC road coating under different brushing amount was comprehensively

收稿日期:2017-09-01

基金项目: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);

天津市城乡建设委员会科学技术发展计划项目(2014-15);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821171115)

作者简介:郭滕滕(1989-),女,山东汶上人,工学博士研究生,E-mail:skdppt@163.com。

通讯作者:王朝辉(1980-),男,河南滑县人,教授,博士研究生导师,E-mail:wchh0205@163.com。

evaluated by indoor and outdoor temperature measuring tests. The contents of various components of vehicle exhaust of WEPC road coating specimen at different intervals were tested by air purification performance box test, and then air purification effects of WEPC coating at different temperatures were comprehensively evaluated. Meanwhile, the pavement performances of WEPC coating were confirmed by surface tectonic depth and pendulum test, abrasion test, rutting test and durability test. And micro-structures of environment-friendly road coating materials with porous properties were analyzed by using the scanning electronic microscopy and infrared spectrum. The results show that WEPC coating has good basic performance when the dosage (mass fraction) of functional material is 20%. WEPC has a good cooling effect, the cooling effect is more significant under a greater amount of brushing, and the highest cooling effect can reach up to 10 °C. Combined with basic properties of WEPC coating and cooling effect, the optimum brushing amount is recommended to be 0.8 kg/m². WEPC coating has a certain effect on air purification at different temperatures and the purification effect is better under the heating interval. The purification rates of particulate matters with particle size below 2.5 (PM_{2.5}) and below 10 microns (PM₁₀) can reach up to more than 40%. In addition, the purification rates of carbon oxides, nitrogen oxides, and sulfur dioxides are about 25%. WEPC coating has good road performance in skid resistance, abrasion resistance, high temperature stability and durability, all of which can meet the requirements of the corresponding specifications. The functional material can be stably and evenly dispersed in the coating material, and some new functional groups are appeared in the coating material. 5 tabs, 10 figs, 26 refs.

Key words: road engineering; coating; porous property; cooling; air purification; road performance

0 引言

沥青路面对太阳热辐射的吸收率高,夏季太阳光持续照射下沥青路面温度不断升高,加剧城市热岛效应,同时导致路面承载能力下降,产生车辙等高温病害^[1]。另外,随着交通量的增加,汽车尾气排放造成的大气污染问题越来越严重^[2]。目前,为了缓解沥青路面高温病害、净化汽车尾气,国内外研究主要集中在铺筑路面涂层的方法方面。关于路面降温涂层材料,Synnefa 等对比研究了 14 种热反射涂层用于降低建筑物及其他物体表面温度的效果^[3];Akbari 等提出将热反射材料用于降低路面温度以缓解热岛效应^[4];Anak Guntor 等开发了一种路面热反射涂层材料,可使沥青路面的表面温度降低 4.4 °C^[5];Anting 等将废旧瓷砖用于沥青路面,利用其良好的反射率降低路面温度,最高降温效果为 6.4 °C^[6-8];王朝辉等基于能量转化原理制备了新型降温涂层,并对其降温效果进行了测试^[9];刘立斌等依据路用涂层材料的基本性能,确定了所制备降温涂层材料的最佳涂刷量及其降温效果^[10-11];孙晓龙等采用负重轮碾压法对不同降温涂层的高温稳定性进行了研究^[12];曹雪娟等研发了以 TiO₂ 为主要材料的降低路面温度的热反射涂层,并将其用于不

同级配的沥青路面,确定了其路用性能及降温效果影响因素^[13-18];郑木莲等以金红石型钛白粉(TiO₂)为填料,制备了热反射涂层材料,并对其降温效果和抗滑性能等进行了研究^[19-20];冯德成等开发了 3 种热反射涂料,并在室内条件下测试了其降温效果^[21];文旭卿等将热反射涂层喷涂于排水沥青路面,并对其降温效果和渗水性能进行了评价^[22];黄文红等铺筑了热反射涂层试验路并对其性能进行了评价^[23];李文珍等以不饱和聚酯为黏结材料制备了路用降温涂料,并对其路用性能进行了全面评价^[24]。关于净化汽车尾气涂层材料,则主要是通过涂层材料中添加 TiO₂^[25-26],通过其光催化分解和光催化氧化还原作用达到净化空气的功效,但是在实际应用中,载体上可涂布 TiO₂ 的有效面积小,加之易受路面污染物的影响,净化效果和综合效益并不理想。由此可见,将 TiO₂ 用于路面涂层材料能够同时起到降温 and 净化空气的作用,但是由于材料本身价格昂贵,导致成本过高,严重限制了该类涂层的推广应用。因此,开发一种价格低廉且具有降温 and 净化空气效果的路用涂层材料,已成为道路工作者今后的研究重点。多孔属性矿物材料价格低廉,吸附性强且导热系数低,具有良好的隔热属性,被广泛用于建筑物外墙涂料,但是将其用作道路涂层材

料的研究鲜有报道。

为此,本文以多孔材料为功能材料,对其进行优化处理后制备环保型路用涂层材料,分析不同路用涂层材料的基本性能,研究其室内控温条件及室外应用环境下的降温效果,确定在不同温度下环保型路用涂层材料的净化空气效果,并全面评价其路用性能。在此基础上,采用扫描电镜和红外光谱技术揭示多孔涂层材料的微观结构,为环保型路用涂层材料的推广应用奠定基础。

1 基于多孔属性的环保型路用涂层材料制备

1.1 原材料组成

以环氧树脂作为涂层黏结材料并采用相应固化剂对其进行固化,JY 和 TB 为功能型材料,其基本性能如表 1 所示,氧化铁热反射材料为辅助性降温材料,陶土为着色材料,助剂采用工业乙醇。

表 1 功能材料物理、化学性能指标

Tab. 1 Physical and chemical properties of functional materials					
材料名称	颜色	密度/ (g · cm ⁻³)	细度/ μm	耐酸碱性能	莫氏硬度
JY	灰白	2.60~2.70	48	难溶于酸碱溶液, 化学性质稳定	1.0~3.0
TB	白	4.26	48	微溶于碱, 溶于浓硫酸	5.5~7.0

1.2 功能型材料优化处理

为改善功能型材料的物理、化学性能,提高其降温功效,首先基于高能球磨法原理对其进行处理以提高其机械活化性能,然后对经球磨后的功能型材料进行表面改性以提高其稳定性和分散性。

(1)机械活化

根据功能型材料 JY 和 TB 的杂质含量、粒径和形貌特征,确定球磨机转速为 378 r/min、球料比为 2.43 : 1、球磨时间为 10 h,在无水乙醇和惰性气体保护下对 JY 和 TB 进行机械活化,制备出中值粒径为 9.91~2.28 μm 的超细 JY 和 TB。

(2)表面改性

以多聚磷酸钠和六偏磷酸钠作为分散剂对经高能球磨法处理后的 JY 和 TB 进行表面改性,减少团聚现象的产生,使其均匀稳定地分散于涂层材料中,以利于降温效果的充分发挥。

1.3 路用涂层材料配方设计及制备

采用优化处理后的功能材料,制备基于多孔属性的环保型路用涂层材料,其配方设计及试验方案

如表 2 所示。

表 2 环保型路用涂层配方设计及试验方案
Tab. 2 Formula design and testing plan of environment-friendly road coating

参数	氧化铁 掺量/%	陶土 掺量/%	功能型材料 掺量/%	涂刷量/ (kg · m ⁻²)
参数值	5	4	10、20、30、40	0.6、0.8、1.0

注:各成份掺量均为质量分数,下同;环氧树脂与固化剂质量比为 3 : 2,工业乙醇用量为涂层材料质量的 20%。

基于多孔属性的环保型路用涂层材料制备过程如下:

(1)准备,将所需材料备齐以供称量,检查测试所需仪器。

(2)称量,按配比分别称量所需 JY、TB、环氧树脂、固化剂、氧化铁、陶土及工业乙醇等相关材料。

(3)搅拌,首先将称量好的环氧树脂和工业乙醇加入 AM90L-P 型电动搅拌机内搅拌均匀,然后分次添加预先称量并混合均匀的 JY、TB 及陶土搅拌均匀,调低转速,分次添加氧化铁并搅拌均匀,即可制得基于多孔属性的环保型路用涂层材料,将其命名为 WEPC。

1.4 环保型路用涂层基本性能

按照不同功能材料掺量(JY 与 TB 的配比为 1 : 1)及不同涂刷量的环保型路用涂层材料,参照《环氧树脂地面涂层材料》(JC/T 1015—2006)和《公路工程质量检验评定标准》(JTG F80/1—2012)(下文均简称规范)对不同环保型路用涂层分别进行干燥时间、黏结强度、硬度计抗冲击性能测试,结果如表 3 所示。

表 3 环保型路用涂层基本性能测试结果

Tab. 3 Test results of basic performances of environment-friendly road coating						
功能材料 掺量/%	涂刷量/ (kg · m ⁻²)	20 ℃ 环境下 干燥时间/h		黏结强 度/MPa	铅笔 硬度	冲击后 表面状况
		表面 干燥	实际 干燥			
10	0.8	6.5	19.5	0.82	5H	涂膜 无裂纹、 无剥落
20	0.6	5.0	19.0	0.79	5H	
	0.8	6.5	20.0	0.91	5H	
30	1.0	8.0	23.0	0.94	5H	
	0.8	6.0	19.0	0.83	6H	
40	0.8	5.5	19.0	0.81	6H	涂膜无裂 纹、无剥落
规范要求		≤8.0	≤24.0	≥0.5 (常温)	≥3H	

由表 3 可知:功能材料掺量及涂刷量对干燥时间的影响较大,相同涂刷量下功能材料掺量越大干燥时间越短,相同掺量下涂刷量越大干燥时间越长;

同一涂刷量下涂层黏结强度随功能材料掺量的增加先增加后降低,20%掺量时黏结强度最大;相同掺量下涂层材料黏结强度随涂刷量的增加而增加;功能材料掺量和涂刷量对铅笔硬度和表面抗冲击性能的影响较小,且其均能满足规范要求。因此,综合经济因素,推荐功能材料最佳掺量为 20%。

2 环保型路用涂层降温功效

2.1 环保型路用涂层降温性能测试方法

所需仪器:笔者课题组开发的路面材料成型试件室外隔热测温保温装置、数字温度计、人工气候培养箱。测温点位于车辙板试件表面、中部及底部中心位置处。室内测试:将涂刷了 WEPC 涂层材料的车辙板试件置于保温装置中,并放入人工气候培养箱内,环境初始温度设定为 20℃,每升高 10℃记录数据 1 次,试验最终温度设为 70℃,如图 1 所示。室外测试:夏季室外高温环境下测定路面温度,测试时间段为 10:00~15:00,每隔 30 min 记录数据 1 次,如图 2 所示。

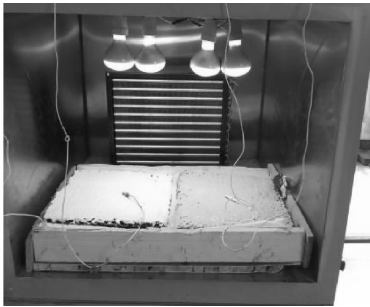


图 1 室内控温条件下涂层试件降温效果测试

Fig.1 Cooling effect test of coating specimen under condition of indoor controlled temperature



图 2 室外涂层试件降温效果测试

Fig.2 Cooling effect test of coating specimen under outdoor

2.2 基于室内控温条件的降温性能

制备基于多孔属性的环保型路用涂层材料,分别按照 0.60、0.80、1.0 kg/m² 的涂刷量均匀涂刷于不同车辙板试件表面,室内控温条件下测试其降温

效果,测试结果如图 3 所示。

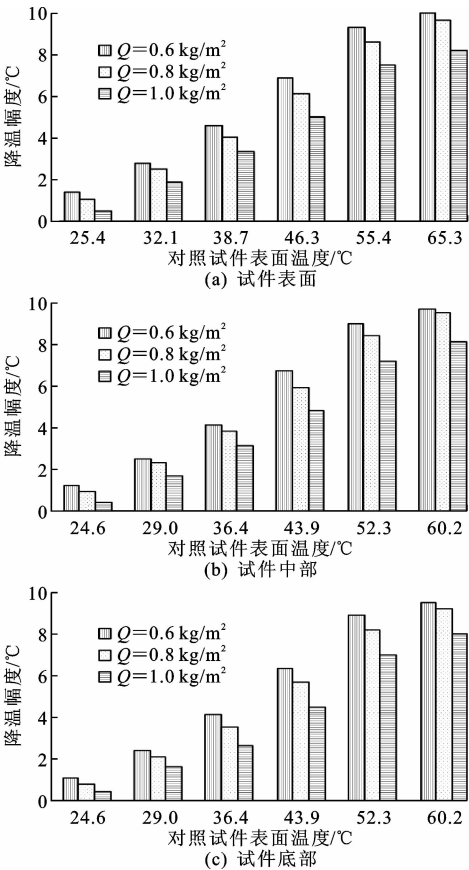


图 3 室内控温条件下 WEPC 涂层降温效果

Fig.3 Cooling effect of WEPC under condition of indoor controlled temperature

由图 3 可知,WEPC 涂层具有良好的降温性能,环境温度越高降温效果越明显,且随着涂刷量的增加,WEPC 涂层试件的表面、中部和下部降温幅度逐渐提高,最高可达 10℃。当涂刷量 Q 由 0.6 kg/m² 增至 0.8 kg/m² 时,涂层降温效果明显提高,继续增加涂刷量至 1.0 kg/m² 时,降温效果增幅并不明显,且该涂刷量下黏结强度仅提高了 3%,提高幅度也不显著;同时该涂刷量下的涂层干燥时间为 8 h,相比 0.8 kg/m² 涂刷量下干燥时间延长了 23%。干燥时间过长不利于尽早开放交通。因此,综合降温效果、基本性能及经济性,推荐涂刷量为 0.8 kg/m²。

2.3 基于室外环境的降温性能

为进一步确定环保型路用涂层的降温效果,对涂刷 WEPC 涂层(涂刷量为 0.8 kg/m²)试件与未涂刷试件进行室外环境下的降温效果测试,结果如下页图 4 所示。

由图 4 可知,室外环境下,WEPC 路用涂层最高降温效果可达 9.3℃,与室内控温环境下测试结果基本一致,充分表明 WEPC 涂层具有良好的降温

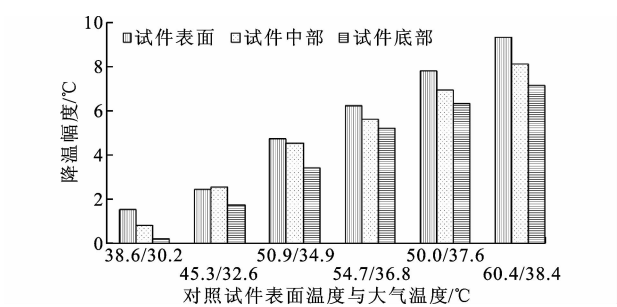


图 4 室外环境下的 WEPC 涂层降温效果

Fig. 4 Cooling effect of WEPC under condition of outdoor environment

效果。通过室内外降温效果测试可知,WEPC 路用涂层的降温效果随环境温度的提高而增加,环境温度越高降温效果越显著。

3 环保型路用涂层净化空气功效

3.1 环保型路用涂层净化空气性能测试方法

试验仪器:空气净化性能测试箱、尾气排放设备、汽车尾气测试分析设备、数字温度计。测试方法:为更好地模拟道路应用环境,进行降温区间和升温区间下环保型路用涂层净化空气性能测试,见图 5 和图 6。考虑到实际应用中沥青路面最高温度达到 70 ℃ 的情况较少,大部分沥青路面最高温度在 60 ℃ 左右,因此在进行环保型路用涂层净化空气功效研究时,温度测试范围主要设定为 30 ℃~60 ℃。由于太阳辐射强度的变化,一天中路面温度存在升温 and 降温阶段,故需分别测试升温及降温阶段环保型多孔涂层的净化空气功效。本文采用的升降温度梯度为 10 ℃,即每升高或降低 10 ℃ 记录 1 次数据。

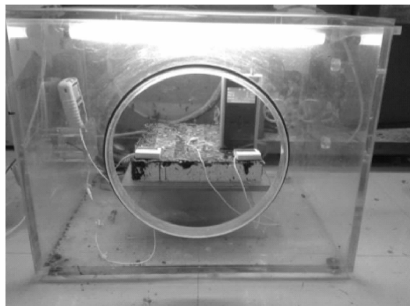


图 5 基于降温区间的净化空气测试

Fig. 5 Air purification test based on cooling interval

3.2 环保型路用涂层净化空气性能

为进一步确定环保型路用涂层的净化空气效果,对涂刷 WEPC 涂层(涂刷量为 0.8 kg/m²)试件进行不同升降温区间下的净化空气效果测试,测试结果如图 7 和图 8 所示。

由图 7 和图 8 可知,WEPC 涂层具有一定的净



图 6 基于升温区间的净化空气测试

Fig. 6 Air purification test based on heating interval

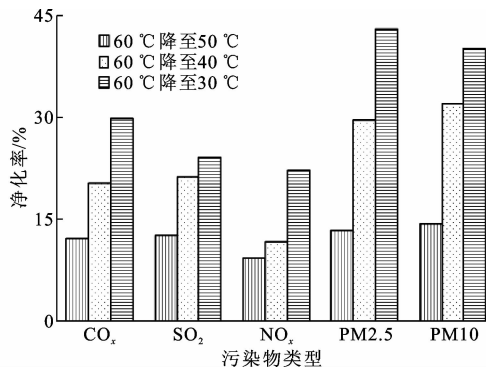


图 7 基于降温区间的 WEPC 涂层净化空气效果

Fig. 7 Air purification effect of WEPC at cooling interval

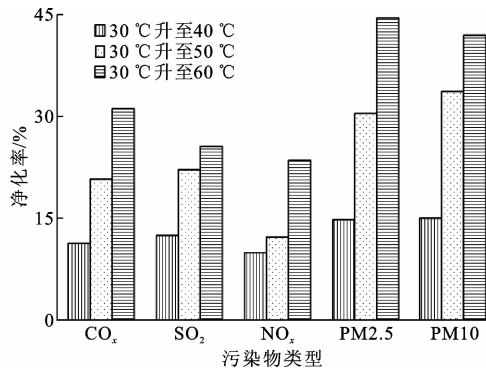


图 8 基于升温区间的 WEPC 涂层净化空气效果

Fig. 8 Air purification effect of WEPC at heating interval

化空气效果,温度降低和上升时,净化效果存在一定差异,温度上升时 WEPC 涂层的净化效果较好。WEPC 涂层对不同污染物的净化效果不同,其中 SO₂ 和 NO_x 的净化率保持在 25% 左右,CO_x 的净化率可达 30%,颗粒污染物 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的净化率可达 40% 以上。

4 环保型路用涂层路用性能

良好的路用性能是环保型路用涂层应用的前提条件,制备 WEPC 涂层材料,按照 0.8 kg/m² 的涂刷量均匀涂刷到车辙板试件表面,参照规范通过路面构造深度试验、抗滑摆值试验、耐磨耗试验、动稳

定度试验及耐久性能试验,全面评价基于多孔属性的环保型涂层的路用性能,如表 5 所示。

表 5 WEPC 路用涂层路用性能试验结果
Tab. 5 Test results of road performance of WEPC coating

性能			涂刷前	涂刷后		规范要求
抗滑性能	构造深度/mm		0.71	0.61		≥0.55
	抗滑摆值/BPN			未洒水	62.6	≥45
				洒水后	51.4	
耐磨耗性能(质量损失)/(g·m ⁻²)				0.111		<0.2
高温 稳定性	是否出现黏轮			68℃时开始出现轻微黏轮现象,温度继续升高黏轮现象加剧		
	动稳定度/(次·mm ⁻¹)		4 335	6 103		≥2 800
耐久 性能	耐水			测试板上的涂膜无气泡、不皱皮、不脱落、无变色		测试板上的涂膜无气泡、不皱皮、不脱落
	耐温变			无粉化、无开裂、无剥落、无起泡、无色变		测试板涂层是否发生粉化、起泡、开裂、剥落等现象,并与留样试件对比颜色变化及光泽下降的程度
	腐蚀	15%NaOH 溶液		涂膜完整,不起泡、不剥落、无色变		涂膜完整,不起泡、不剥落,允许轻微变色
		10%HCl 溶液				
		120# 溶剂汽油				

由表 5 可知:与普通路面相比,0.8 kg/m² 涂刷量下 WEPC 路用涂层路面稳定度提高了 41%;涂刷前后路面构造深度和洒水前后涂层路面抗滑摆值虽都有所降低,但仍满足规范要求;WEPC 路用涂层在高温、冻融循环及化学腐蚀条件下,均未出现粉化、起泡、开裂及色变等损坏,说明 WEPC 路用涂层具有良好的耐久性。因此,基于多孔属性的环保型路用涂层具有良好的路用性能。此外,市场常见 TiO₂ 涂层的价格约为 30 元/m²,而 WEPC 路用涂层价格仅为 23 元/m² 左右,经济性显著。

5 环保型路用涂层材料微观结构

5.1 SEM 分析

采用 JSM-6390A 型扫描电子显微镜,全面评价功能材料在环保型路用涂层材料中的分散性和结合情况。WEPC 路用涂层扫描电镜如图 9 所示。

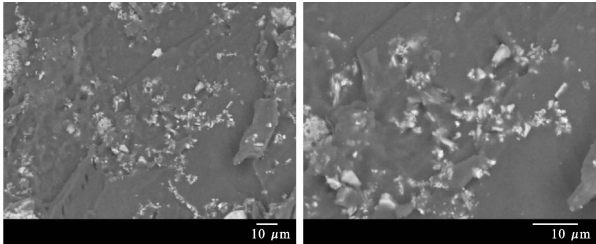


图 9 WEPC 路用涂层 SEM 图
Fig. 9 SEM photos of WEPC material

从图 9 可以看出:亮白色斑点颗粒 JY 和 TB 均匀分布于涂层材料中,以独立颗粒的形式存在于环

保型路用涂层内;功能型材料与辅助材料和着色材料以部分包裹的形式分散于涂层材料内部,亮暗色交替表征了其于胶体间胶结联系紧密。微观图像显示功能材料与载体材料能够以较为稳定均匀的性质分散于涂层中,形成稳定的整体结构。

5.2 FTIR 分析

采用 TENSOR27 型傅里叶变换红外光谱仪,分别对基础涂层(除未添加功能材料外其他成分均与 WEPC 涂层一致)和 WEPC 涂层材料进行红外光谱分析,其 FTIR 如图 10 所示。

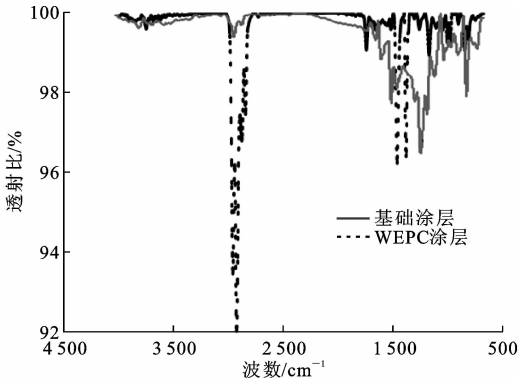


图 10 基础涂层和 WEPC 涂层 FTIR
Fig. 10 FTIR of basic coating and WEPC coating

由图 10 可知,与基础涂层相比,WEPC 涂层在第 1 峰区(4 000~2 500 cm⁻¹)内的 2 923~2 854 cm⁻¹ 范围内出现了较强的吸收峰,在 2 959、2 872 cm⁻¹ 位置处出现了显著的饱和—CH₃ 基的伸缩振动峰,在波数为 1 460、1 375 cm⁻¹ 位置处出现了新的次亚甲

基C—H伸缩振动峰且强度较大,表明有新的官能团出现。在吸收峰明显的波数区段的相同波数位置,WEPC 涂层吸收率均大于基础涂层,表明功能材料的掺入在一定程度上改变了涂层的基本化学性质。

6 结 语

(1)优选了多孔属性材料并对其进行优化处理,制备了具有降温 and 净化空气功效的环保型路用涂层材料 WEPC,功能材料掺量为 20% 时 WEPC 涂层具有良好的基本性能。

(2)WEPC 涂层具有良好的降温效果,且环境温度越高其降温效果越显著,降温幅度最高可以达到 10 ℃。

(3)WEPC 涂层具有一定的净化空气功效,对 PM2.5 和 PM10 的净化率可达 40% 以上,对 CO_x、NO_x 及 SO₂ 的净化率在 25% 左右。

(4)WEPC 涂层具有良好的路用性能,其抗滑性能、耐磨耗性能、高温稳定性能以及耐水、耐温变、耐腐蚀性能均满足路用涂层要求。

(5)功能型材料能够稳定均匀地分散于涂层材料中,功能型材料的掺入在一定程度上改变了涂层材料的基本化学性质,为环保型涂层材料功效的发挥提供了基础条件。

(6)本文主要对 WEPC 路用涂层的基本性能、降温功效和净化空气功效进行了全面研究和评价,分析了 WEPC 涂层材料的微观结构,但尚未对其降温机理和净化空气机理进行相关研究。因此,在后续研究中将对 WEPC 涂层功能效果作用机理展开全面深入的研究。

参考文献:

References:

[1] 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.

[2] 况栋梁,裴建中,李 蕊,等. 改性纳米二氧化钛在净化汽车尾气中的应用研究[J]. 材料导报,2014,28(20):18-22.
KUANG Dong-liang, PEI Jian-zhong, LI Rui, et al. The application research of modified nano titanium di-

oxide in automobile exhaust purification[J]. Materials Review,2014,28(20):18-22.

[3] SYNNEFA A, SANTAMOURIS M, LIVADA I. A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment[J]. Solar Energy, 2006,80(8):968-981.

[4] AKBARI H, MATTHEWS H D. Global cooling updates, Reflective roofs and pavements[J]. Energy & Buildings,2012,55:2-6.

[5] ANAK 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, 2013, 26(4):755-760.

[6] ANTING N, DIN M F M, IWAO K, et al. Optimizing of near infrared region reflectance of mix-waste tile aggregate as coating material for cool pavement with surface temperature measurement [J]. Energy & Buildings,2017,158:172-180.

[7] ANTING N, DIN M F M, IWAO K, et al. Experimental evaluation of thermal performance of cool pavement material using waste tiles in tropical climate[J]. Energy & Buildings,2017,142:211-219.

[8] ANTING N, DIN M F M, PONRAJ M, et al. Optimal mixture design of mix-wasted tile aggregates for reducing pavement surface temperature[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2015,27(9):1-8.

[9] 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 property of road cooling coating material based on energy conversion[J]. China Journal of Highway and Transport,2015,28(8):14-21.

[10] 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.

[11] 刘相儒,殷卫永,张洪华,等. 路用降温涂层抗滑性能研究[J]. 筑路机械与施工机械化,2016,33(3): 68-71.
LIU Xiang-ru, YIN Wei-yong, ZHANG Hong-hua, et al. Research on anti-sliding performance of pavement cooling coating [J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2016,33(3):68-71.

[12] 孙晓龙,王朝辉,张洪华,等. 负重轮碾压的路用降温

- 涂层高温稳定性能[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2016,36(4):18-25.
- SUN Xiao-long, WANG Chao-hui, ZHANG Hong-hua, et al. High temperature stability performance of asphalt road cooling coating based on road wheel tracking test[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2016,36(4):18-25.
- [13] 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):391-393,420.
- 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):391-393,420.
- [14] CAO X J, TANG B M, ZHU H Z, et al. Preparation and performance research of thermosetting heat-reflective coating for asphalt pavement[J]. Advanced Materials Research, 2010,150:44-50.
- [15] CAO X J, TANG B M, ZOU X, et al. Analysis on the cooling effect of a heat-reflective coating for asphalt pavement[J]. Road Materials & Pavement Design, 2015,16(3):716-726.
- [16] CAO X J, TANG B M, YUAN Y, et al. Indoor and outdoor aging behaviors of a heat-reflective coating for pavement in the Chongqing area[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015,28(1):04015079.
- [17] 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.
- TANG Bo-ming, YUAN Ying, CAO Xue-juan, et al. Research on aging process and mechanism of heat-reflective coating of asphalt pavement [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2015,34(3):47-51.
- [18] 曹雪娟,李瑞娇,杨晓宇. 路用环氧类热反射涂料的研制及性能评价[J]. 化工新型材料, 2016,44(12):140-143.
- CAO Xue-juan, LI Rui-jiao, YANG Xiao-yu. Preparation and performance evaluation of epoxy-based heat-reflective coating for the pavement[J]. New Chemical Materials, 2016,44(12):140-143.
- [19] 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.
- [20] ZHENG M L, HAN L L, WANG F, et al. Comparison and analysis on heat reflective coating for asphalt pavement based on cooling effect and anti-skid performance [J]. Construction & Building Materials, 2015,93:1197-1205.
- [21] 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 it's road performance[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010,27(10):17-20.
- [22] 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 thermal reflective coatings in drainage asphalt concrete pavement[J]. Highway, 2012(9):19-23.
- [23] 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):982-985,1085.
- HUANG Wen-hong, WANG Wei, LIU Jun, et al. Construction and performance evaluation of solar heat-reflective coating test road[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2012,31(5):982-985,1085.
- [24] 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):916-918,954.
- 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):916-918,954.
- [25] 孙立军,徐海铭,李剑飞,等. 纳米二氧化钛处治汽车尾气效果与应用方法的研究[J]. 公路交通科技, 2011,28(4):153-158.
- SUN Li-jun, XU Hai-ming, LI Jian-fei, et al. Research on treatment effects of nanometer titanium dioxide on automobile exhaust and application methods[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011,28(4):153-158.
- [26] 乔晓军,李佩,文龙. 纳米二氧化钛环保涂料降解汽车尾气氮氧化物效果研究[J]. 施工技术, 2014,43(增2):664-666.
- QIAO Xiao-jun, LI Pei, WEN Long. Effect study of environmental protection nanometer titanium dioxide coating degrading automobile exhaust nitrogen oxides[J]. Construction Technology, 2014,43(S2):664-666.