

废轮胎热解炭黑(TPCB)改性沥青抗紫外老化性能试验研究

杨晚生¹, 易帅兵^{2*}, 戴天乐², 李甜甜², 甘有为²

(1. 江西宜春市政交通建设有限公司, 江西 宜春 337000; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:为探讨废轮胎热解炭黑(TPCB)改性沥青抗紫外老化性能,制备TPCB改性沥青,对基质沥青和TPCB改性沥青进行不同时段的紫外老化试验。通过原子力显微镜(AFM)试验对比研究两种沥青表面的微观变化和表面粗糙度。通过沥青性能试验检验了两种沥青紫外老化前后延度、软化点、针入度变化行为。研究表明:TPCB改性沥青三维表面形貌图降低高度比基质沥青小,在各时间段的表面粗糙度比基质沥青大;紫外老化前后TPCB改性沥青性能变化值比基质沥青小。与基质沥青相比,TPCB改性沥青具有更好的抗紫外老化性能。

关键词:废轮胎热解炭黑(TPCB)改性沥青;紫外老化试验;微观形貌;沥青表面粗糙度;沥青性能

中图分类号:U416

文献标志码:A

Experimental Research on Anti-UV Aging Performance of Tire Pyrolysis Carbon Black (TPCB) Modified Asphalt

YANG Wansheng¹, YI Shuaibing^{2*}, DAI Tianle², LI Tiantian², GAN Youwei²

(1. Jiangxi Yichun Municipal Traffic Construction Co., Ltd., Yichun, Jiangxi 337000, China; 2. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: To investigate the anti-ultraviolet (UV) aging performance of waste tire pyrolysis carbon black (TPCB)-modified asphalt, TPCB-modified asphalt was prepared and subjected to UV aging tests alongside the base asphalt at various intervals. The micro changes and surface roughness of two kinds of asphalt surfaces were studied by atomic force microscopy (AFM). The behavior changes in ductility, softening point, and penetration of two asphalts before and after UV aging were tested by asphalt performance tests. The results show that the reduction height of TPCB-modified asphalt is smaller than that of base asphalt, and the surface roughness is larger than that of base asphalt at each time. The performance change value of TPCB-modified asphalt before and after UV aging is smaller than that of base asphalt. Compared with the base asphalt, the asphalt modified with pyrolytic carbon black from waste tires has better UV aging resistance.

Keywords: tire pyrolysis carbon black modified asphalt; UV aging test; microscopic morphology; asphalt surface roughness; asphalt performance

0 引言

废轮胎热解炭黑(Tire Pyrolysis Carbon Black, 简称TPCB)改性沥青,是将TPCB作为沥青改性剂,

配制的一种新型改性沥青。相比普通沥青,它提高了沥青路面的抗磨耗性,并改善沥青感温性^[1-2];提高了沥青混合料的高温性能和抗渗性,降低了温度敏感性,但对疲劳性能和低温性能无影响^[3-4]。这种新

收稿日期:2023-01-25

基金项目:江西省交通运输厅科技项目(编号:2020H0023,2021H0019);湖南省研究生科研创新项目(编号:SJCX202106)

作者简介:杨晚生,男,高级工程师.E-mail:284922619@qq.com

*通信作者:易帅兵,男,硕士研究生.E-mail:xiaoyi@stu.csust.edu.cn

型改性沥青既利用了廉价的 TPCB,又提高了沥青的高温性能,是一种高温性能突出,其他性能基本保持不变的廉价改性沥青^[5-6]。该改性沥青已经在中国宜春市成功铺筑试验路,经过近 2 年运行,性能良好^[7]。现有紫外老化研究多集中于基质沥青^[8-12]、SBS 改性沥青^[13-16]和橡胶粉改性沥青^[17]等,大多只涉及老化后物理性能的变化和影响。而研究 TPCB 改性沥青抗紫外老化性能较少^[18-20]。本文以 70# 基质沥青和 10% 掺量的 TPCB 改性沥青为研究对象,进行不同时段紫外老化。采用原子力显微镜(AFM)试验,对紫外老化后的基质沥青和 TPCB 改性沥青不同时段内微观结构的变化进行定量分析,研究两种沥青老化后的延度、软化点、针入度随老化时段的变化规律。

1 原材料和紫外老化试验

1.1 原材料

(1) 基质沥青

采用 70#A 级基质沥青。依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)^[21]对其进行基本物理性能检测,技术性能满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)^[22]中的标准。

(2) 废轮胎热解炭黑(TPCB)

TPCB 基本性能检测结果见表 1,指标满足标准^[23]技术要求。

表 1 TPCB 检验结果

Table 1 TPCB test results

检测项目	单位	检测结果	技术要求	试验方法
灰分	%	13.8	≤18.5	GB/T 3780.10
吸碘值	mg/g	8.1	≥8.0	GB/T 3780.1
吸油值	mL/100 g	7.6	≥7.0	GB/T 3780.2
pH		6.54	≥6.0	GB/T 3780.7
含水率	%	2.4	≤3.0	GB/T 3780.8
外观		黑色粉末	黑色粉末	—

(3) TPCB 改性沥青

根据国内外相关的研究^[1-2]和推荐,10%TPCB 改性沥青性能是最佳的。

制备方法及具体步骤^[1]:①取 TPCB 平铺于铁盘中,放在烘箱(温度 110℃左右)预热 6 h,去除其中的水分;②使用电子天平称取 70#基质沥青 500 g,放置烘箱中加热至 135℃,最终形成流动状态;③称取

10% 沥青质量 TPCB 掺加到 70#基质沥青中,边加入边使用玻璃棒搅拌,使其混合均匀;④沥青的剪切先使用低的速率进行,使温度逐渐上升至 145℃,调整剪切速率为 4 000 r/min,剪切 45 min,制备完成。

对 TPCB 改性沥青进行相关性能试验,结果见表 2。

表 2 TPCB 改性沥青的检测结果

Table 2 Test results of TPCB-modified asphalt

性能指标	单位	检测结果	技术要求	试验方法
针入度(100 g, 5 s, 25℃)	0.1 mm	53.4	—	T0604—2011
软化点	℃	53.0	—	T0606—2011
延度(10 cm/min, 10℃)	cm	22.8	—	T0605—2011

1.2 紫外老化试验

参考现有的沥青紫外老化研究^[11,14,23],结合 TPCB 改性沥青使用条件,选择沥青紫外老化试验参数为:光源选择高压汞灯,紫外光主波长为 365 nm,辐照强度设定为 21.0 W/m²。老化时间分别拟定 0、24 h、72 h、170 h、310 h、360 h 和 400 h,紫外设备内部温度为(50±0.5)℃。

1.2.1 沥青试样的制备

首先分别取 70#沥青和 TPCB 改性沥青,将它们分别放入烘箱加热,控制烘箱温度不超过 130℃。等到两种沥青达到流动形态时,取(10±0.1)g 倒入直径为 90 mm、高度为 1.5 cm 的玻璃皿中。将装有沥青试样的玻璃皿放入 130℃烘箱中 5 min,使沥青自然流平,制成 1.5 mm 厚的沥青膜。冷却至常温后,使用硅油纸做的纸条包裹住玻璃皿,用胶带固定,这样可以保证紫外光照射的只是沥青试样的正面,贴好试样的编号以便分辨日期。1、2、3、4、5、6 号为 70#沥青,1'、2'、3'、4'、5'、6' 号为 TPCB 改性沥青。然后将试样放入室内模拟老化箱中进行紫外光老化。装有沥青试样的玻璃皿如图 1 所示。

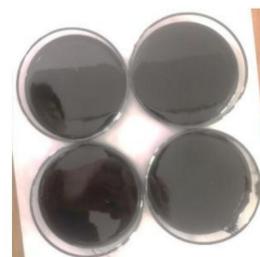


图 1 未老化沥青试样

Figure 1 Unaged asphalt samples

1.2.2 表征沥青微观形貌试验

沥青表面具有特殊的峰形结构,随老化时间会发生变化,原子力显微镜AFM可以检测出沥青老化后微观形貌的变化。然后基于沥青表面微观形貌的高度图和相图,分析沥青的峰形结构尺寸及数量变化、不同相的比例及相界变化。

AFM测试要求样品表面光滑,需要在试验之前将沥青置于相应的硅片上,具体操作步骤如下:

(1) 首先将沥青试样加热 160 °C 至熔融流动状态。

(2) 将约 0.1 g 沥青滴在 0.5 mm×0.5 mm 干净的硅片上。

(3) 15 min 之后关闭烘箱,利用余温使试样冷却。之后便可以进行试验。

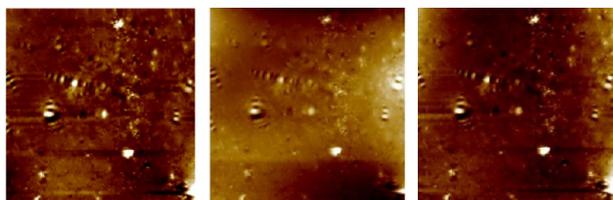
2 试验结果及分析

原子力显微镜是利用探针扫描试样的表面,获得其表观变化的信息,将数据传回系统进行处理,可以得到样品的表观图和相图,以此来分析表观形貌的变化。

2.1 紫外老化后沥青微观形貌

试验使用 0.4 N/m 的探针测得形貌图,使用 40 N/m 的探针测得相图。调整参数扫描速率为 1.0 Hz,扫描面积为 15 μm×15 μm,仪器分辨率为 512×512,温度为 25 °C。

对获得的初期数据先用 Analysis 进行处理,排除误差,使用 Flatten 功能。首先打开数据得到原始图图 2(a),使用 plane FIT 干净化获得图 2(b),再使用 Flatten 扁平化获得图 2(c),两阶段获得的形貌图用于 AFM 正常分析微观结构。



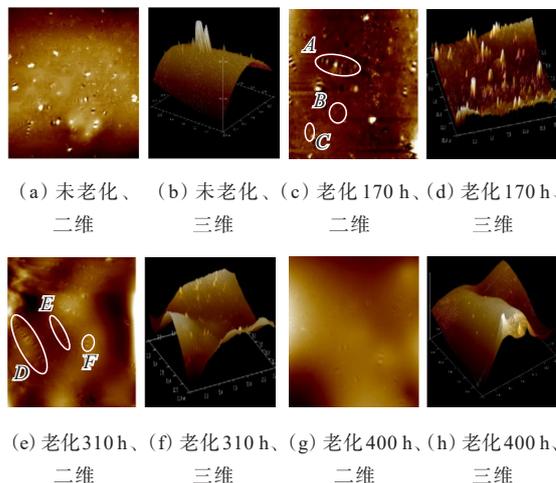
(a) 原始图 (b) 干净化阶段修正 (c) 扁平化阶段修正

图 2 修正前后沥青表观形貌对比图

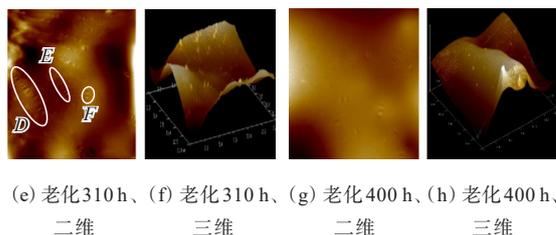
Figure 2 Comparison of asphalt surface morphology before and after correction

2.1.1 微观形貌特征

基质沥青老化后的二维和三维形貌见图 3, TPCB 改性沥青老化后的二维和三维微观形貌图见图 4。



(a) 未老化、(b) 未老化、(c) 老化 170 h、(d) 老化 170 h、
二维 三维 二维 三维

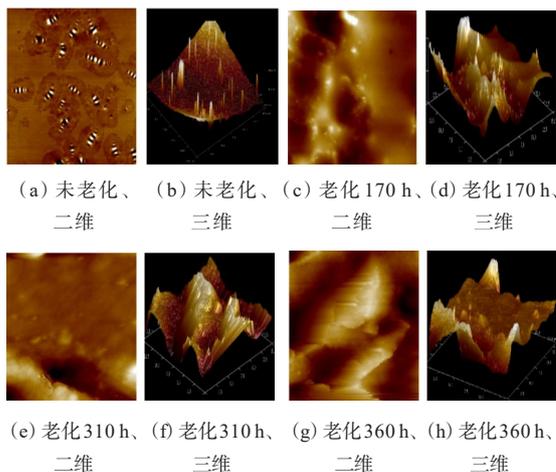


(e) 老化 310 h、(f) 老化 310 h、(g) 老化 400 h、(h) 老化 400 h、
二维 三维 二维 三维

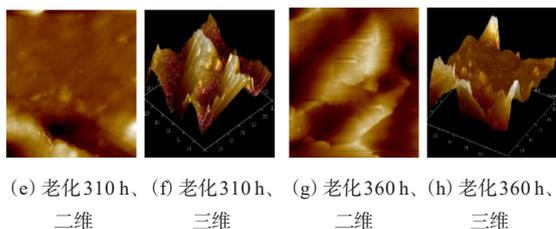
注:(a)纵坐标范围:-33.2~27.9 nm;(c)纵坐标范围:-23.3~33.8 nm;(e)纵坐标范围:-181.8~164.6 nm;(g)纵坐标范围为:-361.3~292.5 nm。

图 3 老化后基质沥青的表观形貌图

Figure 3 Appearance and morphology of base asphalt after aging



(a) 未老化、(b) 未老化、(c) 老化 170 h、(d) 老化 170 h、
二维 三维 二维 三维



(e) 老化 310 h、(f) 老化 310 h、(g) 老化 360 h、(h) 老化 360 h、
二维 三维 二维 三维

注:(a)纵坐标范围:-17.3~16.4 nm;(c)纵坐标范围:-175.1~169.3 nm;(e)纵坐标范围:-475.7~441.2 nm;(g)纵坐标范围为:-484.2~503.3 nm。

图 4 老化后 TPCB 改性沥青表观形貌图

Figure 4 Appearance and morphology of TPCB-modified asphalt after aging

从图 3 可以看出:基质沥青“蜂状结构”最多,数量相对较多。经过紫外老化的基质沥青试样在二维和三维上都发生了变化。试样的表面变得粗糙,有分散物出现,当沥青处在老化初期的时候,其表面还是平滑的,“蜂状结构”较多,但是厚度不均一。图 3(a)显示,A 类为类似于蜂状的结构呈现凸起,明显的部位是垂直突起的沥青表面的峰,暗色的部位是沥青

凹进去的谷,所以B类区域部分较低,C类区域部分较高;随着老化时间的增加,也改变了“蜂状结构”的数量及面积。观察图3(c)中D位置发生变化,处在位置F要比E的波峰高,F处的粗糙更严重。

随着老化时间的增加,“蜂状结构”的个数减少,相应的“蜂状结构”的面积呈现出增大的趋势,在三维形貌图上表现出“蜂状结构”亮白色的区域不断变少,波峰部分的高度增大,随老化时间增加,“蜂状结构”发生发育现象,且老化程度越大发育程度越明显。因为老化使得沥青中物质发生转移,沥青质含量增多,沥青质的增加使得构成晶核的物质增加,晶核之间靠近后聚合,使得“蜂状结构”面积呈现增大。

由图4可以看出:在老化时间增加的过程中,形貌出现了“蜂状结构”和处在中间连续相,晶体和非晶体共存。紫外老化对TPCB沥青的影响同基质沥青相同,随着老化时间的增加,老化程度的加深,会引起“蜂状结构”减少,而相应的“蜂状结构”的面积变大。不同的是,TPCB沥青的“蜂状结构”数量多面积小。炭黑以小颗粒形态分散在沥青中,使沥青保持稳定的结构,表现为“蜂状结构”面积变小且数量多。

加入TPCB后,促进了沥青质的分散,从而蜂状面积增多。然而老化降解了TPCB,随着TPCB被降解,也减弱了沥青质的分散能力,TPCB改性剂的含量减少,其分散作用也减弱,使得蜂状结构数量有了一定程度的增多。

两种沥青在紫外老化后,三维表现形貌图中的最大高度都有所降低,且TPCB沥青降低高度略小于基质沥青的。这是由于经紫外光老化后沥青表面轻质成分流失,使三维图中的最大高度降低,但表面较硬组分构成的结构不容易被破坏,使TPCB沥青的最大高度降低较小。这可能与TPCB阻止沥青轻质组分流失有关,在一定程度上延缓沥青老化进程。

2.1.2 相图定量分析

图5、6为经过老化后的基质沥青、TPCB改性沥青相图。

由图5、6可知:不同老化时间下的沥青相图都具有相似的表面结构。

有学者^[24-25]研究沥青的微观结构的相态之间的

差别使用到均方根粗糙度 R_q ,各个相态之间如果差异越大,其微观分离情况越严重,其相对应的 R_q 越大。为了定量分析沥青微观相态之间的差异性,本文引入 R_q 来定量分析两种沥青在不同老化时段的微观结构差异。

均方根粗糙度 $R_q(\text{nm})$ 表征沥青微观相态之间的差异。这里的 R_q 是指在取样试样的长度范围内,轮廓线和其平均线存在的偏差,取其平均方根。

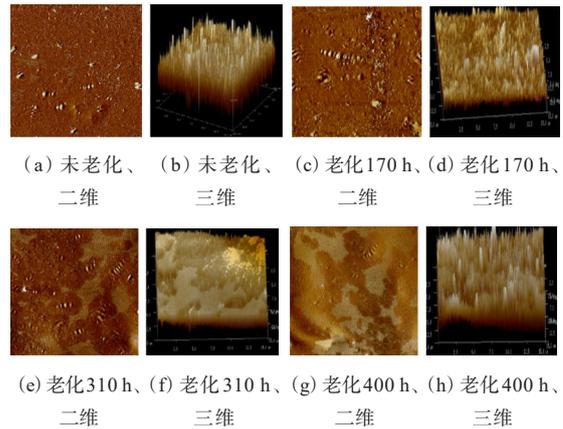


图5 基质沥青相图

Figure 5 Phase diagram of base asphalt

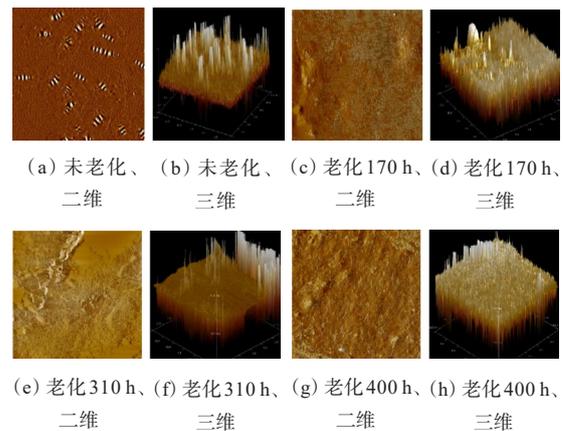


图6 TPCB改性沥青相图

Figure 6 Phase diagram of TPCB-modified asphalt

$$R_q = \sqrt{\frac{\iint (h(x,y) - h_0)^2 - d_s}{\iint d_s}}$$

式中: R_q 为均方根粗糙度(nm); $h(x,y)$ 为形貌的高度(nm); h_0 为参考高度(nm); d_s 为AFM扫描区域大小(nm^2)。

粗糙度 R_q 可以表征试样的表面粗糙程度,也可以用来体现沥青的组分占比变化,进而分析沥青的

性能变化。

分析试样的相图粗糙程度,将相图试验结果图导入 Nano Scope Analysis 软件,点击左上方的“Roughness”项目,可以得到 R_q 。两种沥青不同老化时间分析计算测试结果如表3所示。

表3 沥青表面粗糙度指标

Table 3 Roughness index of asphalt surface

沥青种类	老化时间/	均方根粗糙度	变化率/
	h	R_q /nm	%
基质沥青	0	2.73	—
	24	2.44	10.50
	310	2.06	15.57
	400	1.47	28.64
	0	9.65	—
TPCB改性沥青	24	8.92	7.65
	310	8.31	6.84
	400	6.42	22.74

由表3可知:TPCB改性沥青的各时间段的粗糙度总体比基质沥青大,这是因为TPCB的加入,增大了“蜂状结构”相态与其他结构相态的差异。TPCB改性沥青具有较多数量的“蜂状结构”,但是它的平

均面积较小。老化使沥青组分占比发生变化,芳香分则会转向为胶质,胶质往沥青质的部分转化,导致饱和分占比下降,沥青质增加。组分的变化减小了相态间的差异性,所以当老化时间增加时, R_q 是逐渐变小的趋势。

当紫外老化310 h时,基质沥青表面粗糙度降低了15.57%,而TPCB沥青表面粗糙度下降了6.84%;紫外老化400 h时,基质沥青表面粗糙度降低了28.64%,而TPCB沥青表面粗糙度下降了22.74%;在各紫外老化时间段基质沥青的 R_q 变化值一直大于TPCB沥青,说明沥青在老化作用下相态的粗糙度变化可以通过加入TPCB来减缓。TPCB改性沥青的变化幅度小,受老化影响较小,其抗老化性比基质沥青要好。

2.2 紫外老化后沥青的常规性能试验

沥青的常规性能常用三大指标来评价,针入度、延度和软化点,数据也比较直观,可以较好地分析沥青老化后的物理性能变化。

对沥青试样进行不同时间的紫外老化后,按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)进行三大指标的检测,试验结果见表4。

表4 沥青常规性能指标检测结果

Table 4 Conventional performance indexes of asphalt

沥青种类	紫外老化时间/h	针入度(100 g, 5 s, 25 °C)/(0.1 mm)		软化点/°C		延度(10 cm/min, 10 °C)/cm	
		测量值	变化值	测量值	变化值	测量值	保留率
		基质沥青	0	60.1	—	48.0	—
24	54.9		-5.2	49.9	+1.9	22.6	84.3
72	51.4		-3.5	52.4	+2.5	18.7	82.7
170	48.7		-2.7	56.2	+3.8	14.8	79.1
310	46.2		-2.5	58.9	+2.7	10.9	73.7
360	43.8		-2.4	60.1	+1.2	7.7	70.6
400	41.6		-2.2	62.9	+2.8	5.2	67.5
TPCB改性沥青	0	53.4	—	53.0	—	22.8	—
	24	49.7	-3.7	54.1	+1.1	21.6	94.8
	72	47.4	-2.3	56.3	+2.2	20.2	92.2
	170	45.3	-2.1	58.0	+1.7	18.7	92.6
	310	43.4	-1.9	59.1	+1.1	16.9	90.3
	360	41.7	-1.7	59.9	+0.8	14.4	85.2
	400	40.2	-1.5	60.6	+0.7	11.6	80.6

同时间段对比可以发现,TPCB沥青与基质沥青比较,其可以增加沥青的抗老化性能,减小沥青的老化程度,减小针入度的降低趋势,使得沥青表现出更为优异的抗老化性能。随着老化时间的变化,两种沥青的软化点变大,一定程度上改善了老化后沥青的高温性能。TPCB沥青每个时间段软化点的变化值都比基质沥青的变化值小,这是因为TPCB改性剂的加入,使其变化幅度减小,减少了老化对沥青的影响,抗老化能力有所提高。在老化初期,延度下降速率较为显著,随着时间的延长,延度下降偏缓。TPCB沥青的延度减小值比基质沥青的减小值小,炭黑沥青老化后的延度保留率比基质沥青有一定的提高,表明TPCB的加入可以改善沥青老化后的延展性并增强沥青的抗老化能力。

TPCB改性沥青紫外老化后的软化点增加值、针入度减小值和延度保留率均优于基质沥青,验证了TPCB改性沥青的抗紫外老化性能更好。

3 结论

利用AFM检测TPCB改性沥青和基质沥青试样的表观形貌,得到两种沥青在各个老化时间段的形貌图和相图。通过Nano Scope Analysis分析软件得到二维和三维图,对“蜂状结构”和表面粗糙度进行了分析。通过常规的沥青性能试验对两种沥青抗紫外老化性能进行了验证。主要结论如下:

(1) 基质沥青和10%TPCB沥青在紫外老化后,三维表观形貌图中的最大高度都有所降低,但TPCB改性沥青降低高度均略小于基质沥青的,表明TPCB能延缓沥青老化进程。

(2) 10%TPCB改性沥青的表面粗糙度比基质沥青要高。随老化时间增加,老化均降低了两种沥青的表面粗糙度,减小了相态之间差异。但TPCB沥青比基质沥青降低幅度小,表现出较好的抗紫外老化能力。

(3) TPCB改性沥青紫外老化后的软化点增加值、针入度减小值和延度保留率均优于基质沥青,验证了TPCB改性沥青的抗紫外老化性能更好。

参考文献:

References:

[1] 孟潇飞,甘新众,甘有为,等.干法废轮胎热解炭黑改性沥

青混合料室内制备工艺参数及其路用性能检测评价[J].公路,2022,67(4): 62-70.

MENG Xiaofei,GAN Xinzhong,GAN Youwei,et al.Indoor preparation process parameters and road performance test evaluation of pyrolytic carbon black modified asphalt mixture made from waste tires by dry-casting method[J].Highway,2022,67(4): 62-70.

[2] 宋伟.废旧轮胎热解炭黑改性沥青及其混合料性能研究[D].长沙:长沙理工大学,2019.

SONG Wei. Study on performance of pyrolytic carbon black modified asphalt of waste tire and its mixture[D].Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019.

[3] LI C M,FAN Z R,WU S P,et al.Effect of carbon black nanoparticles from the pyrolysis of discarded tires on the performance of asphalt and its mixtures[J]. Applied Sciences,2018,8(4): 624.

[4] 李闯民,彭博,甘新众,等.干法和湿法制备TPCB改性沥青混合料的路用性能室内试验研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(2): 49-60.

LI Chuangmin,PENG Bo,GAN Xinzhong,et al.Indoor test research on road performance of TPCB modified asphalt mixture prepared by dry and wet method[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science),2022,19(2): 49-60.

[5] CHEN A Q,DENG Q H,LI Y Y,et al.Harmless treatment and environmentally friendly application of waste tires—TPCB/TPO composite-modified bitumen[J]. Construction and Building Materials,2022,325: 126785.

[6] LI C M,NING F B,LI Y Y.Effect of carbon black on the dynamic moduli of asphalt mixtures and its master curves [J].Frontiers of Structural and Civil Engineering,2019,13 (4): 918-925.

[7] 禹辉,孟潇飞,甘新众,等.干投法废轮胎热解炭黑改性沥青表面层首件工程工艺试验研究[J].公路,2022,67(2):7-15.

YU Hui,MENG Xiaofei,GAN Xinzhong,et al.Research on the first piece engineering process of the surface layer of pyrolytic carbon black modified asphalt made from waste tires by dry-casting method[J].Highway,2022,67(2): 7-15.

[8] 胡锦轩.沥青紫外老化行为及其老化动力学研究[D].武汉:武汉理工大学,2018.

HU Jinxuan. Research on ultraviolet ageing performance and ageing dynamic of bitumen[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2018.

[9] 黄森.多种光稳定剂对沥青抗紫外老化协同作用的影响

- 研究[J].湖南交通科技,2022,48(2):16-20,33.
- HUANG Miao. Study on the synergistic effect of various light stabilizers on ultraviolet aging resistance of asphalt [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2022, 48(2): 16-20, 33.
- [10] 纪小平,侯月琴,郑南翔. 沥青热氧老化的非线性预测[J]. 长安大学学报(自然科学版),2009,29(4):13-15,38.
- JI Xiaoping, HOU Yueqin, ZHENG Nanxiang. Nonlinear prediction of asphalt thermal and oxygen aging[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2009, 29(4): 13-15, 38.
- [11] 江承建. 不同紫外强度下耐老化沥青性能与适用性研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2015.
- JIANG Chengjian. Effect of various intensities of UV irradiation on performance and adaptability of aging-resistant asphalt binder[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.
- [12] LI Y G, ZHOU X. Effect of ultraviolet aging on composition, structure and properties of asphalt[J]. Key Engineering Materials, 2021, 891: 201-204.
- [13] 葛豪. 基于紫外老化的改性沥青性能研究[J]. 科学技术创新, 2020(17): 110-111.
- GE Hao. Study on properties of modified asphalt based on ultraviolet aging[J]. Scientific and Technological Innovation, 2020(17): 110-111.
- [14] 李焯宏. 改性沥青抗紫外老化性能研究[J]. 辽宁省交通高等专科学校学报, 2020, 22(1): 4-7.
- LI Yehong. Study on ultraviolet aging resistance of modified asphalt[J]. Journal of Liaoning Provincial College of Communications, 2020, 22(1): 4-7.
- [15] LI J, YANG J, LIU Y, et al. Fabrication of IPDI-LDHs/SBS modified asphalt with enhanced thermal aging and UV aging resistance[J]. Construction and Building Materials, 2021, 302: 124131.
- [16] YANG J, MUHAMMAD Y, YANG C L, et al. Preparation of TiO₂/PS-rGO incorporated SBS modified asphalt with enhanced resistance against ultraviolet aging[J]. Construction and Building Materials, 2021, 276: 121461.
- [17] WANG L, CUI S C, FENG L. Research on the influence of ultraviolet aging on the interfacial cracking characteristics of warm mix crumb rubber modified asphalt mortar[J]. Construction and Building Materials, 2021, 281: 122556.
- [18] 甘有为. 再生炭黑改性沥青机理研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2018.
- GAN Youwei. The research on mechanism of pyrolytic carbon black from used tire asphalt[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2018.
- [19] 宋伟, 骆斌斌, 李闯民, 等. 废轮胎热解炭黑改性沥青混合料室内试验与评价[J]. 中外公路, 2022, 42(1): 244-248.
- SONG Wei, LUO Binbin, LI Chuangmin, et al. Laboratory test and evaluation of asphalt mixture modified with pyrolysis carbon black from waste tires[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(1): 244-248.
- [20] 李因翔, 陈洪庆, 李闯民, 等. 废旧轮胎热解炭黑改性沥青性能室内试验研究[J]. 中外公路, 2021, 41(2): 296-300.
- LI Yinxiang, CHEN Hongqing, LI Chuangmin, et al. Laboratory test on performance of pyrolytic carbon black asphalt modified with waste tire[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(2): 296-300.
- [21] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- Research Institute of Highway Ministry of Transport. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011[S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [22] 交通部公路科学研究所. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- Research Institute of Highway Ministry of Transport. Technical specifications for construction of highway asphalt pavements: JTG F40—2004[S]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [23] 全国交通工程设施(公路)标准化技术委员会. 沥青混合料改性添加剂 第7部分: 废旧轮胎热解炭黑: JT/T 860.7—2017[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- Traffic Engineering Facilities Highway. Modifier for asphalt mixture—Part 7: Pyrolytic carbon black from used tire: JT/T 860.7—2017[S]. Beijing: China Communications Press, 2017.
- [24] 易军艳, 庞骁奕, 姚冬冬, 等. 基于原子力显微镜技术的沥青与矿料表面粗糙度及黏附特性[J]. 复合材料学报, 2017, 34(5): 1111-1121.
- YI Junyan, PANG Xiaoyi, YAO Dongdong, et al. Characterization of surface roughness and adhesive mechanism of asphalt and mineral aggregate based on atomic force microscopy method[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(5): 1111-1121.
- [25] HOU Y, WANG L B, WANG D W, et al. Characterization of bitumen micro-mechanical behaviors using AFM, phase dynamics theory and MD simulation[J]. Materials, 2017, 10(2): 208.