【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

WFO-CR 改性沥青的分子结构变化与抗老化性能

牛冬瑜^{1,2}, 谢希望², 杨政险³, 张蔚⁴, 盛燕萍², 熊锐²

- 1) 公路建设与养护技术、材料及装备交通运输行业研发中心(甘肃路桥建设集团有限公司), 甘肃兰州 730030;
2) 长安大学材料科学与工程学院, 陕西西安 710061; 3) 福州大学土木工程学院, 福建福州 350116;
4) 福建省建筑科学研究院有限责任公司, 福建福州 350108

摘要: 为充分利用固、液废弃资源, 改善沥青高低温性能缺陷, 将复配煎炸废油(waste frying oil, WFO)与废胎橡胶粉(crumb rubber, CR)用于制备改性沥青, 以开发一种可持续路面材料. 采用常规沥青试验、短期老化试验和傅里叶红外光谱试验, 分析短期老化后不同质量分数 WFO-CR 复合改性沥青的性能指标及化学分子结构的变化规律. 结果表明: 短期老化后, 不同质量分数 WFO-CR 复合改性沥青的残留针入度比、软化点增值和残留延度比均优于基质沥青, 抗老化性能改善明显. 傅里叶红外光谱试验结果表明, WFO-CR 复合改性沥青中代表烯基或苯环 C=C 键的 814 cm^{-1} 和 720 cm^{-1} 处的吸收峰峰值明显增大; 不同质量分数 WFO-CR 复合沥青的羰基吸收峰和亚砷基吸收峰均有增强. 由碳基指数和亚砷基指数定量分析可知, 当 WFO 与 CR 的质量分数分别为 5.0% 和 20.0% 时, 碳基指数和亚砷基指数最低, 相比基质沥青分别降低了 36.02% 和 32.04%, 对沥青抗老化性能的改善效果最好.

关键词: 道路工程; 改性沥青; 短期老化; 煎炸废油; 废旧橡胶粉; 傅里叶红外光谱; 分子结构
中图分类号: U414 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/SP.J.1249.2020.06589

Molecular structure change and anti-aging performance of WFO-CR composite modified asphalts

NIU Dongyu^{1,2}, XIE Xiwang², YANG Zhengxian³, ZHANG Wei⁴,
SHENG Yanping², and XIONG Rui²

- 1) Research and Development Center of Transport Industry of Technologies, Materials and Equipments of Highway Construction and Maintenance, Gansu Road & Bridge Construction Group, Lanzhou 730030, Gansu Province, P. R. China
2) School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi Province, P. R. China
3) College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, Fujian Province, P. R. China
4) Fujian Academy of Building Research Co. Ltd., Fuzhou 350108, Fujian Province, P. R. China

Abstract: In order to use the solid and liquid waste resources to improve performances of base asphalt, waste frying oil (WFO) and crumb rubber (CR) are used to modify the asphalt to obtain the sustainable pavement material. The molecular structures and the performances of the modified asphalts with different amounts of WFO and CR are

Received: 2020-02-01; **Accepted:** 2020-06-21

Foundation: Open Fund Project of R & D Center of Transport Industry of Technologies, Materials and Equipments of Highway Construction and Maintenance (GLKF201812); National Natural Science Foundation of China (51608045, 51608046); Fujian Science and Technology Plan Guiding Project (2019Y0048); Fuzhou Company Research Cooperation Project of China Communications Construction Company Second Navigation Bureau Engineering Co. Ltd. (00501901)

Corresponding author: Associate professor NIU Dongyu. E-mail: dongyu.niu@chd.edu.cn

Citation: NIU Dongyu, XIE Xiwang, YANG Zhengxian, et al. Molecular structure change and anti-aging performance of WFO-CR composite modified asphalts [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(6): 589-596. (in Chinese)

analyzed by conventional asphalt methods, short-term aging test and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). The results indicate that the retained penetration ratio (RPR), the softening point increment (SPI) and retained ductility ratio (RDR) indexes of modified asphalts with different amounts of WFO-CR composite are better than those of the base asphalt after short-term aging test. WFO and CR can improve anti-aging performance. Moreover, FT-IR results show that the absorption peaks at 814 cm^{-1} and 720 cm^{-1} , which represent the alkenyl or benzene ring $\text{C}=\text{C}$ in WFO-CR composite modified asphalt after short-term aging, increase obviously. Both the carbonyl absorption peak and the sulfoxide absorption peak are improved for modified asphalts with different amounts of WFO-CR composite. The quantitative analysis shows that the carbonyl and sulfoxide indices of the modified asphalt reach the lowest values with 5.0% WFO and 20.0% CR, which are 36.02% and 32.04% lower than those of the base asphalt, respectively.

Key words: road engineering; modified asphalt; short-term aging; waste frying oil; crumb rubber; Fourier transform infrared spectroscopy; molecular structures

煎炸废油(waste frying oil, WFO)作为生物废弃油脂,是餐饮业的副产品,含有黄曲霉毒素、胆固醇、生物胺和酮等有害物质,若不加工处理就循环使用会严重危害人类的健康,直接排放也会污染环境^[1]. 由于WFO黏度低且量大,部分学者将WFO作为沥青的再生剂和改性剂,不仅可固化其中的有害物质,还可进一步开发可持续发展道路新材料^[2-5]. 另一种工业固体废弃物——废胎橡胶粉(crumb rubber, CR)可作为改性剂制备橡胶改性沥青. CR与沥青相容性差,难以形成均相结构,且CR吸收沥青轻组分后,导致沥青黏度增大,增加施工难度,影响工程质量,这些都限制了CR在沥青路面的广泛应用^[6-9]. 为充分利用这两种固、液废弃资源,越来越多的学者关注有效综合利用生物废弃油脂和CR来制备复合改性沥青. PERALTA等^[10]采用红橡木热解生物油制备橡胶沥青,可有效降低其加工温度,并改善抗疲劳和低温抗裂性能. FINI等^[11-12]研究表明,猪粪生物油可改善橡胶沥青的流变性能,降低压实温度,提高存储稳定性和抗疲劳开裂性能. LEI等^[13]以玉米秸秆热解生物油和橡胶粉复合改性沥青,可改善复合沥青的高温性能与短期老化后的弹性. 方烁等^[14]采用废机油和植物油制备活化胶粉,可改善沥青的弹性性能及抗变形能力.

综上所述,不同类型生物油与CR的复合改性沥青,高温性能、低温抗裂性能及流变性能均有不同程度的改善. 本研究选取WFO和CR制备改性沥青,分析不同质量分数的WFO和CR对短期老化后改性沥青性能的影响,借助傅里叶红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR)试验,从微观角度,探析不同质量分数WFO和CR对短期

老化后改性沥青化学分子结构的变化规律,研究结果对可持续绿色路面材料的推广与应用有重要参考.

1 试验材料及方法

1.1 原材料

基质沥青(base asphalt, BA)为SK70#道路石油沥青,BA和CR的参数分别见表1和表2. WFO为西安某油条店提供煎炸废油,化学组成成分见表3.

表1 BA的技术参数

Table 1 Technical parameters of base asphalt

试验指标	实测值	规范值	试验规范
0.1 mm 时针入度(25℃)	65	60~80	T0604
软化点/℃	52	≥46	T0606
延度(15℃)/cm	≥100	≥100	T0605

表2 CR的物理化学参数

Table 2 Physical and chemical parameters of crumb rubber

技术参数	质量指标	检测结果
水质量分数/%	<1	0.72
相对密度	1.10~1.30	1.18
金属质量分数/%	<0.01	0.01
纤维质量分数/%	<1	0.12
灰度/%	≤8	7.00

1.2 WFO-CR 复合改性沥青的制备

选取WFO的5个质量分数分别为0、2.5%、5.0%、7.5%和10.0%,选取CR的3个质量分数分

表3 WFO 的化学组成

Table 3 Chemical composition of waste frying oil

%

材料	w (十二 烷酸)	w (十四 (烷)酸)	w (软 脂酸)	w (硬 脂酸)	w (十八 烯酸)	w (亚油 酸)	w (γ -亚 麻酸)	w (亚 麻酸)	w (二十碳不 饱和脂肪酸)	w (二十 碳烯酸)
WFO	0.34	1.03	38.35	4.33	43.67	11.39	0.37	0.29	0.16	0.08

别为 10%、15% 和 20%，将不同质量分数的 WFO 与 CR 进行双因素组合，制备 15 种改性沥青。

WFO-CR 复合改性沥青制备工艺分为混溶阶段、高速剪切阶段与发育阶段。根据文献[15]，选取加工参数：剪切温度为 180 ℃，剪切时间为 90 min，剪切速率为 5 000 r/min，发育温度为 150 ℃，发育时间为 60 min。

1.3 试验方法及评价指标

本研究采用旋转薄膜烘箱试验对沥青试样进行短期老化，利用残留针入度比 (retained penetration ratio, RPR)、软化点增值 (softening point increment, SPI) 和残留延度比 (retained ductility ratio, RDR) 评价其抗短期老化性能。

采用 Avatar360E. S. P. 型傅立叶变换红外光谱仪，在波数 400 ~ 4 000 cm^{-1} 内，利用衰减全反射红外光谱对 15 种 WFO-CR 复合改性沥青试样进行测试。为定量分析 15 种沥青的老化程度，采用吸收峰面积比来分析短期老化前后 WFO-CR 复合改性沥青官能团浓度的变化，以 600 ~ 2 000 cm^{-1} 吸收峰面积的和作为参考区域，以沥青样品羰基和亚砷基官能团的相关区域与参考区域的面积比来定量评价沥青的老化程度^[16-17]，

$$I_{\text{C=O}} = \frac{S_{1\,710}}{S_{2\,000 \sim 600}} \tag{1}$$

$$I_{\text{S=O}} = \frac{S_{1\,034}}{S_{2\,000 \sim 600}} \tag{2}$$

其中， $S_{1\,710}$ 为羰基官能团的相关区域面积； $S_{1\,034}$ 为亚砷基官能团的相关区域面积； $S_{2\,000 \sim 600}$ 为 600 ~ 2 000 cm^{-1} 吸收峰区域面积； $I_{\text{C=O}}$ 为碳基指数； $I_{\text{S=O}}$ 为亚砷基指数。

2 试验结果及分析

2.1 沥青旋转薄膜加热试验结果分析

2.1.1 残留针入度比

WFO-CR 复合改性沥青的 RPR 值如图 1。由图 1 可见，改性沥青的 RPR 值远大于基质沥青，表明

WFO 与 CR 加入能显著提高基质沥青的抗老化性能。CR 的质量分数越高，RPR 值越大，说明增大 CR 的质量分数可有效提高抗老化性能。随着 WFO 的增多，RPR 值先增大后减小，当 WFO 的质量分数为 2.5%、CR 的质量分数为 10% 时，RPR 值影响最小，可较好提升其抗老化性能。当 WFO 的质量分数大于 2.5% 时，过量的 WFO 掺入，等效于存在过量轻质油分，旋转加热过程中易于挥发，未能充分发挥抗老化性能。

图1 WFO-CR 复合改性沥青的残留针入度比 (25 ℃)

Fig. 1 Retained penetration ratio of WFO-CR composite modified asphalt (25 ℃)

2.1.2 软化点增值

WFO-CR 复合改性沥青的 SPI 如图 2。由图 2 可见，改性沥青的 SPI 均低于基质沥青，说明 WFO 与 CR 可有效缓解改性沥青老化后软化点的上升，提升了抗老化性能。随 CR 质量分数增加，SPI 呈下降趋势，反映出 CR 的掺入有利于缓解改性沥青老化过程中引起的沥青硬化。随 WFO 质量分数增加，SPI 先减小后增大，表明 WFO 的质量分数在 2.5%~5.0% 时，可以发挥抗老化的性能。

2.1.3 残留延度比

图 3 为 5 ℃ 下 WFO-CR 复合改性沥青的残留延度比。由图 3 可见，改性沥青的 RDR 明显高于基质沥青，说明 WFO 与 CR 可有效确保老化后改性沥青的低温抗裂性能。RDR 随 CR 增加而增大，当 CR

图2 WFO-CR 复合改性沥青的软化点增值
Fig. 2 Softening point increment of WFO-CR composite modified asphalt

的质量分数由 10% 增至 20% 时, RDR 平均上升 24%, 表明提高 CR 的质量分数有利于确保老化后改性沥青的低温抗裂性能. 随着 WFO 质量分数的增加, RDR 也逐渐降低, 但降幅不大, 这是由于在沥青旋转薄膜加热试验过程中, WFO 挥发, 导致改善效果减弱.

图3 WFO-CR 复合改性沥青的残留延度比 (5 °C)
Fig. 3 Retained ductility ratio of WFO-CR composite modified asphalt (5 °C)

2.2 傅里叶红外光谱试验结果及分析

2.2.1 CR 在复合改性沥青中的改性作用

CR 及 CR 改性沥青的红外光谱图如图 4. 其中, C20W10 表示 CR 的质量分数为 20%, WFO 的质量分数为 10%. 由图 4 可见, 1 710 cm^{-1} 处是羰基吸收峰, 可避免干扰, 反映了沥青受热氧老化作用所引起的变化; 1 585 cm^{-1} 处是苯环的共轭双键 C=C 伸缩振动吸收峰; 1 455 cm^{-1} 处是不对称亚甲基

C—H 键的伸缩振动; 1 375 cm^{-1} 处是对称甲基 C—H 键的伸缩振动; 1 034 cm^{-1} 处是亚砷基的伸缩振动吸收峰, 可以用来判沥青的老化程度; 865、814 和 720 cm^{-1} 处 3 个小峰为对应芳香族分子的特征峰^[18].

由图 4 (a) 可见, 20% 质量分数的 CR 改性沥青图谱与基质沥青图谱趋势大体一致, 说明前者的部分图谱是由基质沥青图谱与 CR 图谱叠加而成, 即 CR 改性作用中包含了物理改性作用. 但 CR 改性沥青图谱中特征区内, 1 585、1 455 和 1 375 cm^{-1} 处吸收峰峰值均较强于基质沥青, 说明 CR 改性沥青中 C—H 键和 C=C 双键明显增多, 这是由于 CR 的分子链发生降解后释放出苯乙烯和丁二烯等有机化合物, 并溶于沥青所致; 此外, 相较于基质沥青, CR 改性沥青在 814 cm^{-1} 和 720 cm^{-1} 处吸收峰

(a) CR、基质沥青和CR改性沥青的红外光谱

(b) 不同CR改性沥青的红外光谱

图4 CR 及 CR 改性沥青的红外光谱

Fig. 4 Infrared spectrogram of CR and CR modified asphalt

的峰值增大,这也与CR在沥青中溶胀、降解后释放的芳香类有机化合物有关^[19].这些图谱变化也说明CR改性沥青同样包含化学改性作用.由图4(b)可见,CR的质量分数越高,溶胀与降解反应越强烈,从而使各吸收峰强度增大.

2.2.2 WFO在复合改性沥青中的改性作用

WFO及WFO改性沥青的红外光谱如图5.由图5可知,2 000~500 cm⁻¹内出现了3处较强的吸收峰,分别位于1 730、1 150和720 cm⁻¹.其中,1 730 cm⁻¹处是酯类C=O的振动吸收峰;1 150 cm⁻¹处是酯类不对称C—O—C的伸缩振动吸收峰;720 cm⁻¹处是烷基—(CH₂)_n—的弯曲振动吸收峰,表明WFO中含有大量芳香烃.

由图5(a)可知,WFO-CR复合改性沥青和CR改性沥青各吸收峰的位置大体一致,加入WFO的

复合改性沥青中没有新基团形成.WFO-CR复合改性沥青分别在1 730 cm⁻¹和1 150 cm⁻¹处出现吸收峰,且强度远低于WFO,这是由于CR已吸收部分WFO,或者部分WFO在制备过程中已挥发消失,使WFO-CR复合改性沥青中羧酸C=O和不对称C—O—C的减少,从而使该处吸收峰减弱.由图5(b)可知,WFO质量分数越高,各吸收峰强度相对降低,这由于WFO整体吸光度较低,随着WFO质量分数的增加,影响了原改性沥青的各吸收峰,使其峰值相对减弱.

2.2.3 WFO-CR复合改性沥青短期老化特征定性分析

图6为3种类型沥青短期老化前后的FT-IR谱图.由图6可知,基质沥青、CR改性沥青和WFO-CR复合改性沥青大部分吸收峰位置无明显变化.但在短期老化后,两种改性沥青中代表烯基或苯环C=C键的814 cm⁻¹和720 cm⁻¹处的吸收峰增大,且WFO-CR复合改性沥青的变化更为明显.这是因为WFO-CR复合改性沥青短期老化后芳香分和胶质的增多^[19-20].另一方面,相较于老化前,3种类型沥青老化后的FT-IR谱图在1 710 cm⁻¹处出现羰基吸收峰,在1 034 cm⁻¹处出现亚砷基吸收峰,符合沥青老化的典型特征.但与WFO-CR复合改性沥青相比,基质沥青的羰基吸收峰与亚砷基吸收峰的变化更为明显,说明基质沥青的老化程度更严重,CR与WFO复合改性一定程度上削弱了热氧老化对沥青的负面影响.

2.2.4 WFO-CR复合改性沥青短期老化特征定量分析

由于WFO-CR复合改性沥青热氧老化后,部分含氧官能团特征吸收峰变化明显.因此,可依据氧化过程中出现的羰基吸收峰(1 710 cm⁻¹)和硫化物被氧化产生的亚砷基吸收峰(1 034 cm⁻¹)来定量表征WFO-CR复合改性沥青的老化程度^[16-17].图7为短期老化后WFO-CR复合改性沥青的FT-IR谱图.由图7可见,当WFO的质量分数为5.0%时,随着CR质量分数增大,对应芳香族分子的814 cm⁻¹和720 cm⁻¹处强度明显增大,表明随CR质量分数增大,芳香族分子增多.其中,小部分芳香族分子来源于WFO,大部分源于CR的溶胀与降解反应.CR的质量分数为20.0%时,随着WFO质量分数的增大,各吸收峰强度略有减少,这表明短期老化过程加速了WFO的挥发,减小了WFO吸光度较低对复合改性沥青各吸收峰的影响.

(a) WFO和WFO改性沥青的红外光谱

(b) 不同WFO改性沥青的红外光谱

图5 WFO及WFO改性沥青的红外光谱
Fig.5 Infrared spectrogram of WFO and WFO modified asphalt

(a) 基质沥青

(b) C20W0.0

(c) C20W5.0

图 6 3 种类型沥青短期老化前后的红外光谱

Fig. 6 Infrared spectrogram of three types of asphalt before and after short-term aging

基于吸收峰面积比的计算公式, 计算不同质量分数的 WFO-CR 复合改性沥青老化前后的碳基指数 $I_{C=O}$ 和亚砷基指数 $I_{S=O}$, 结果如表 4. 由表 4 可知, 短期老化后, 相较于 WFO-CR 复合改性沥青, 基质沥青的 $I_{C=O}$ 和 $I_{S=O}$ 较大, 说明其老化程度较严重.

(a) $w(\text{CR}) = 5.0\%$ (b) $w(\text{CR}) = 20.0\%$

图 7 短期老化后 WFO-CR 复合改性沥青的红外图谱

Fig. 7 Infrared spectrogram of WFO-CR composite modified asphalt after short-term aging

当 WFO 质量分数为 5.0% 时, 随着 CR 质量分数增大, 氧化官能团指数逐渐下降. CR 质量分数由 10% 增至 15% 时, $I_{C=O}$ 降低 12.06%, $I_{S=O}$ 降低 13.50%; CR 质量分数由 15% 增至 20% 时, $I_{C=O}$ 降低 8.04%, $I_{S=O}$ 降低 12.91%. 由此说明, CR 的加入可以缓解热氧老化作用对复合改性沥青的影响, 增强复合改性沥青的抗老化性能, 且 CR 质量分数越高, 抗老化效果越好, 这与前面宏观性能试验结果一致.

老化后, 当 CR 质量分数为 20% 时, 随着 WFO 质量分数增大, $I_{C=O}$ 和 $I_{S=O}$ 先减小后增大, WFO 质量分数为 5% 时, $I_{C=O}$ 和 $I_{S=O}$ 为最低值, 相较于基质沥青分别降低了 36.02% 和 32.04%. 由此说明, 加入适量的 WFO 可在一定程度上改善热氧老化作

用,但过量的 WFO 加入对提高抗老化性能没有明显效果.

表4 短期老化后 WFO 与 CR 复合改性沥青的
羰基指数和亚砷基指数

Table 4 Carbonyl index and sulfoxide index of WFO-CR
composite modified asphalt after short-term aging

沥青类型	$I_{C=O}$	$I_{S=O}$
基质沥青	0.042 51	0.029 87
C20W0.0	0.033 25	0.024 62
C20W2.5	0.028 23	0.021 98
C20W5.0	0.027 20	0.020 30
C20W7.5	0.032 96	0.020 94
C20W10.0	0.036 81	0.021 54
C10W5.0	0.033 64	0.026 95
C15W5.0	0.029 58	0.023 31
C20W5.0	0.027 20	0.020 30

3 结 论

1) 不同质量分数 WFO-CR 复合改性沥青的 RPR、SPI 及 RDR 指标均优于基质沥青与单一胶粉改性沥青,表明复合改性可有效提高沥青的抗老化性能.

2) 短期老化后, WFO-CR 复合改性沥青中代表烯基或苯环 $C=C$ 键的 814 cm^{-1} 和 720 cm^{-1} 处的吸收峰变化特征明显. 当 WFO 质量分数为 5.0% 时,随着 CR 质量分数增大,对应该处吸收峰也明显增强.

3) 当 CR 质量分数为 20.0% 时,随着 WFO 质量分数增大,各吸收峰强度略有降低,这表明由于短期老化作用,加速了沥青中 WFO 的挥发,减小了吸光度较低的 WFO 对复合改性沥青各吸收峰的影响.

4) 短期老化后,不同质量分数 WFO-CR 复合沥青的羰基吸收峰和亚砷基吸收峰均有增强,由 $I_{C=O}$ 和 $I_{S=O}$ 定量分析可知,当 WFO 与 CR 的质量分数分别为 5.0% 和 20% 时,其氧化官能团指数 $I_{C=O}$ 和 $I_{S=O}$ 为最低值,相较于基质沥青分别降低了 36.02% 和 32.04%.

5) 综合 RPR、SPI、RDR 和 FT-IR 试验结果,当 CR 质量分数为 20%, WFO 质量分数在 2.5% ~ 5% 内,其复合改性沥青的综合抗老化性能较优.

基金项目: 公路建设与养护技术、材料及装备交通运输行业研发中心(甘肃路桥建设集团有限公司)开放基金资助项目(GLKF201812); 国家自然科学基金资助项目(51608045, 51608046); 福建省科技计划项目(2019Y0048); 中交第二航务局工程有限公司福州公司科研合作项目(00501901)

作者简介: 牛冬瑜(1984—), 长安大学副教授、博士. 研究方向: 道路材料科学与工程. E-mail: dongyu_niu@chd.edu.cn

引 文: 牛冬瑜, 谢希望, 杨政险, 等. WFO-CR 改性沥青的分子结构变化与抗老化性能[J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(6): 589-596.

参考文献 / References:

- [1] 姚志龙, 闵恩泽. 废弃食用油脂的危害与资源化利用[J]. 天然气工业, 2010, 30(5): 123-128.
YAO Zhilong, MIN Enze. Harm and resource utilization of waste edible oil [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(5): 123-128. (in Chinese)
- [2] ASLI H, AHMADINIA E, ZARGAR M, et al. Investigation on physical properties of waste cooking oil-rejuvenated bitumen binder [J]. Construction and Building Materials, 2012, 37: 398-405.
- [3] CHEN Meizhu, LENG Binbin, WU Shaopeng, et al. Physical, chemical and rheological properties of waste edible vegetable oil rejuvenated asphalt binders [J]. Construction and Building Materials, 2014, 66: 286-298.
- [4] ZARGAR M, AHMADINIA E, ASLI H, et al. Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 233: 254-258.
- [5] SU Junfei, QIU Jian, SCHLANGEN E, et al. Investigation the possibility of a new approach of using microcapsules containing waste cooking oil: In situ-rejuvenation for aged bitumen [J]. Construction and Building Materials, 2015, 74: 83-92.
- [6] 肖 川, 凌天清. 废旧橡胶粉改性沥青材料在道路工程中的应用与研究[J]. 公路工程, 2009, 34(4): 49-53.
XIAO Chuan, LING Tianqing. Research of waste crumb rubber modified used in highway engineering [J]. Highway Engineering, 2009, 34(4): 49-53. (in Chinese)
- [7] 李廷刚, 李金钟, 李 伟. 橡胶沥青微观机理研究及其公路工程应用[J]. 公路交通科技, 2011, 28(1): 25-30.

LI Tinggang, LI Jinzhong, LI Wei. Micro-mechanism

<http://journal.szu.edu.cn>

- study and road engineering application of rubber asphalt [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(1): 25-30. (in Chinese)
- [8] LEE S J, AKISETTY C K, AMIRKHANIAN S N. The effect of crumb rubber modifier (CRM) on the performance properties of rubberized binders in HMA pavements [J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(7): 1368-1376.
- [9] PRESTI D L. Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: a literature review [J]. Construction and Building Materials, 2013, 49: 863-881.
- [10] PERALTA J, SILVA H, WILLIAMS R, et al. Development of an innovative bio-binder using asphalt-rubber technology [J]. International Journal of Pavement Research & Technology, 2013, 6(4): 447-456.
- [11] FINI E H, BOCOUM A, HOSSEINNEZHAD S, et al. Bio-modification of rubberized asphalt and its high temperature properties [J]. Transportation Research Record, 2015, 2506(1): 81-89.
- [12] FINI E H, HOSSEINNEZHAD S, OLDHAM D, et al. Bio-modification of rubberised asphalt binder to enhance its performance [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2019, 20(10): 1216-1225.
- [13] LEI Yong, WANG Hainian, FINI E H, et al. Evaluation of the effect of bio-oil on the high-temperature performance of rubber modified asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2018, 191: 692-701.
- [14] 方 烁, 张广泰, 叶 奋. 植物油活化胶粉沥青流变及微观性能研究[J]. 公路工程, 2018, 43(4): 116-119, 132.
FANG Shuo, ZHANG Guangtai, YE Fen. Rheological and micro properties of vegetable oils as activators for rubberized asphalt [J]. Highway Engineering, 2018, 43(4): 116-119, 132. (in Chinese)
- [15] 牛冬瑜, 马英新, 仁乾龙珠, 等. 加工参数对地沟油/废旧橡胶粉复合改性沥青性能的影响[J]. 江苏大学学报自然科学版, 2018, 39(3): 355-361.
NIU Dongyu, MA Yingxin, RENQIAN Longzhu, et al. Influence of process parameters on waste oil and crumb rubber composite modified asphalt [J]. Journal of Jiangsu University Natural Science, 2018, 39(3): 355-361. (in Chinese)
- [16] ZENG Wenbo, WU Shaopeng, WEN Jin, et al. The temperature effects in aging index of asphalt during UV aging process [J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 1125-1131.
- [17] YAO Hui, DAI Qingli, YOU Zhanping. Fourier transform infrared spectroscopy characterization of aging-related properties of original and nano-modified asphalt binders [J]. Construction and Building Materials, 2015, 101: 1078-1087.
- [18] 徐 鹏, 陈华鑫, 牛冬瑜, 等. 基于 FT-IR 谱图分区的彩色沥青性能对比分析[J]. 深圳大学学报理工版, 2018, 35(2): 146-150.
XU Peng, CHEN Huaxin, NIU Dongyu, et al. Comparative analysis of performance of colored asphalt based on the partition of FTIR graph [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2018, 35(2): 146-150. (in Chinese)
- [19] 丁 湛, 邹 鹏, 栗培龙. 胶粉在改性沥青中的物化行为分析[J]. 应用化学, 2017, 34(2): 204-210.
DING Zhan, ZOU Peng, LI Peilong. Analysis of physico-chemical behavior of rubber powder in modified asphalt [J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2017, 34(2): 204-210. (in Chinese)
- [20] 何 亮, 马 育, 凌天清, 等. 橡胶改性沥青及老化特征微观尺度分析[J]. 功能材料, 2015, 46(21): 21093-21098.
HE Liang, MA Yu, LING Tianqing, et al. Micro-scale analysis of rubber modified asphalt and aging characteristics [J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(21): 21093-21098. (in Chinese)
- 【中文责编: 坪 梓; 英文责编: 之 聿】