

# 再生剂对回收沥青胶浆化学组分及流变特性参数的影响

李 萍,陈隆建,念腾飞,林 梅

(兰州理工大学土木工程学院,甘肃 兰州 730050)

**摘 要** 目的 研究沥青路面回收沥青胶浆再生前后的化学组分及流变特性参数变化规律,为沥青路面再生技术推广提供基础理论与技术支撑。方法 采用傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)和动态剪切流变仪(DSR)进行温度扫描,测试回收沥青胶浆及不同再生剂掺量再生沥青胶浆的化学组分、流变特性参数。结果 随着再生剂掺量的增加,回收沥青胶浆IB脂肪族官能团指数逐渐增大,而 $I_{C=O}$ 羰基指数和 $I_{S=O}$ 亚砷基官能团指数逐渐降低;加入再生剂后回收沥青胶浆的复数剪切模量、车辙因子和疲劳因子具有一定程度的降低,而相位角则具有一定程度的增加。结论 随着再生剂掺量的增加,回收沥青胶浆化学组分发生变化使得回收沥青胶浆路用性能得到显著改善。

**关键词** 回收沥青胶浆;再生剂;再生沥青胶浆;FTIR;流变特性参数

中图分类号 TU58<sup>+</sup>1;U414

文献标志码 A

## Effect of Regenerant on Chemical Composition and Rheological Properties of Recycled Asphalt Mortar

LI Ping, CHEN Longjian, NIAN Tengfei, LIN Mei

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, China, 730050)

**Abstract:** The purpose of this paper is to study the effect of regenerant on the chemical composition and rheological properties of recycled asphalt mortar recovered from asphalt pavement, which provided basic theory and technical support for the promotion of asphalt pavement regeneration technology. The FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) test and temperature sweep of DSR (Dynamic Shear Rheological) test were applied to measure the changes in chemical composition and rheological properties of asphalt mortar with different regenerant dosage. The results show that the IB aliphatic functional group index of the recycled asphalt mortar gradually increased with the increase of the regenerant dosage, while the  $I_{C=O}$  carbonyl index and the  $I_{S=O}$  sulfoxide-based functional group index decreased gradually. The complex shear modulus, rutting factor and fatigue factor of the asphalt mortar recovered after the addition of the regenerant

收稿日期:2019-05-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51868047;51668041)

作者简介:李萍(1972—),女,教授,博士研究生导师,主要从事路面结构设计与材料特性方面研究。

have a certain degree of reduction, while the phase angle has a certain degree of increase. With the increase of the amount of regenerant, the chemical composition of the recovered asphalt mortar changed, and the road performance of the recycled asphalt mortar was significantly improved.

**Key words:** recycled asphalt mortar; regenerant; recycling asphalt mortar; FTIR; rheological property parameters

全国公路建设高速发展后,随之迎来了公路建设、养护与维修并重的高潮,路面养护与维修过程中铣刨产生大量旧沥青混合料,大量旧沥青路面材料如不加以合理利用,不仅资源浪费而且污染环境,因此,沥青路面再生技术逐渐被广泛使用.沥青路面再生技术是通过向旧沥青混合料中加入再生剂或软沥青来调节老化沥青的化学成分,从而使旧沥青混合料的各项性能得到一定程度恢复,然后再次使用于路面的过程<sup>[1]</sup>.

近年来,国内外学者对老化沥青及再生沥青的化学组分和高低温流变特性进行了大量研究.何兆益等<sup>[2]</sup>采用 FTIR 试验对 SBS 改性沥青的再生机理进行了研究, SBS 改性沥青加入再生剂后,在沥青质与软沥青之间形成一层界面膜,起到润滑和增溶作用,从而使老化沥青的黏度减小,高温流变性能得到恢复.李君峰<sup>[3]</sup>采用 FTIR 试验分别研究了生物沥青、老化沥青、生物沥青再生沥青.表明生物沥青同老化沥青之间主要为物理融合作用,但不排除发生了弱化学反应.鄢然<sup>[4]</sup>采用室内模拟老化方式获得了老化 SBS 改性沥青进行再生研究,发现再生沥青的高温车辙性能和低温抗裂性能得到提高.张海涛等<sup>[5]</sup>向室内模拟老化沥青中加入再生剂和改性剂得到了复合再生改性沥青并进行了宏观与微观试验,发现再生与改性技术的结合可以使老化沥青的高低温性能均得到了较好地恢复.李晓民等<sup>[1]</sup>采用 DSR 和弯曲梁流变仪(BBR)对经人工模拟老化后加入再生剂制得的再生沥青进行试验研究.再生剂使老化沥青的高温抗车辙能力下降但低温抗裂性能得到提高. M. C. Cavalli 等<sup>[6]</sup>对再生沥青

进行了试验研究,结果表明再生剂可以增强老化沥青的力学性能,且再生剂引起的力学性能变化不是由化学键或官能团水平的变化引起的,而是由于极性或非极性组分重排导致的. M. Elkashef 等<sup>[7]</sup>采用 DSR 和 BBR 对再生沥青进行测试,发现再生沥青的临界高温和低温显著降低,且 BBR 主曲线的研究表明,再生沥青的蠕变柔量显著改善即抵抗疲劳开裂的能力显著提升. M. L. Zeng 等<sup>[8]</sup>以蓖麻油生产中的残留物作为再生剂,将不同含量的再生剂添加到 PAV 老化的沥青中进行 DSR 测试和 BBR 测试以表征再生沥青的流变性质,研究表明老化沥青的复数模量显著降低,并且随着再生剂含量的增加,相角增加,即老化沥青的黏弹性恢复.目前大多研究是通过室内试验来模拟沥青的老化,这与实际路面使用时沥青的老化条件具有较大差异,导致回收沥青胶浆(回收沥青中含极微量矿粉)与人工模拟老化得到的老化沥青性能具有较大差异,且再生剂对回收沥青胶浆的化学组分及宏观流变特性参数方面还需进一步研究,故笔者采用旧沥青路面铣刨料经抽提回收得到的回收沥青胶浆作为原材料,采用动态剪切流变试验和傅里叶变换红外光谱试验对再生剂、回收沥青胶浆及再生沥青胶浆进行研究,探索再生剂对回收沥青胶浆化学组分及流变特性参数的影响.

## 1 试验

### 1.1 试验材料

笔者将甘肃省定西某路段公路沥青路面铣刨料用三氯乙烯溶液进行浸泡,然后将含老化沥青的三氯乙烯溶液进行抽提得到

的回收沥青胶浆作为原材料.

1.2 再生剂

目前国外常采用的再生剂主要是工业废油、石化油、原样沥青等. 由于我国再生技术发展较晚, 目前再生剂类型较多却大都未普及使用, 例如生物油、合成油、废油等<sup>[9-10]</sup>. 笔者研究中使用的再生剂为石油化工业的副产品合成物, 其主要性能指标如表 1 所示.

表 1 再生剂技术指标

Table 1 Technical indicators of regenerant			
黏度(60 ℃)/ (mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	饱和分/%	芳香分/%
109	0.908	35.4	28.6

1.3 试验方法

1.3.1 老化沥青回收试验

旧沥青路面中老化沥青的回收包括两个步骤: 从路面铣刨料中抽提沥青即溶解铣刨料上的沥青; 从含老化沥青的三氯乙烯溶液中回收老化沥青. 首先用三氯乙烯浸泡铣刨料并静置 72 h, 然后将溶液倒入离心机中按照离心抽提的方法进行离心, 离心完成后的上部溶液即为纯三氯乙烯沥青溶液, 再采用旋转蒸发器(见图 1)进行蒸发, 蒸发完成后立即将烧瓶内的沥青倒出即得到了回收沥青胶浆.



图 1 旋转蒸发器

Fig. 1 Rotary evaporator

1.3.2 回收沥青胶浆再生试验

再生剂掺量分别为 8%、9%、10%; 将回收沥青胶浆在 135 ℃下加热至可流动状态后将再生剂掺入, 使用高速搅拌机在 135 ℃下搅拌 3~5 min, 即可得到不同再生剂掺量的

再生沥青胶浆.

1.3.3 傅里叶变换红外光谱试验

傅里叶变换红外光谱技术目前广泛用于沥青的化学组分研究中. 笔者采用 Thermo Scientific Nicolet iS5 红外光谱仪, 分辨率为 4 cm<sup>-1</sup>, 扫描次数为 32 次, 测试范围 650~4 000 cm<sup>-1</sup>. 用加热后的刮刀蘸取沥青胶浆试样然后均匀地涂抹到 ATR 晶体上进行扫描, 依次扫描回收沥青胶浆、再生剂、再生沥青胶浆得到 FTIR 红外谱图, 扫描结果采用 Thermo Scientific OMNIC 和 TQ Analyst 软件进行分析.

FTIR 试验结果分析方法: 依据朗伯-比耳(Lambert-Beer)定律可以从化学官能团变化来定量分析再生前后沥青胶浆的组分变化规律<sup>[11]</sup>, 在 Thermo Scientific OMNIC 软件中将 FTIR 红外光谱图纵坐标转换为吸光度, 然后以特征峰两侧最低点的切线为基线来计算特征峰面积, 按照参考文献[12-13]进行基线选取及峰面积计算, 以 2 000~650 cm<sup>-1</sup> 内波谱的峰面积和作为计算基准, 其对不同沥青特征官能团的官能团指数进行计算:

I<sub>B</sub> = (A<sub>2920</sub> + A<sub>2850</sub>) / ∑2 000 ~ 650, (1)

I<sub>C=O</sub> = A<sub>1700</sub> / ∑2 000 ~ 650, (2)

I<sub>S=O</sub> = A<sub>1021</sub> / ∑2 000 ~ 650. (3)

式中: I<sub>B</sub> 为脂肪族官能团指数; I<sub>C=O</sub> 为羰基官能团指数; I<sub>S=O</sub> 为亚砷基官能团指数; A<sub>2920</sub>、A<sub>2850</sub>、A<sub>1700</sub>、A<sub>1021</sub> 分别为 2920、2850、1700、1021 处对应的峰面积.

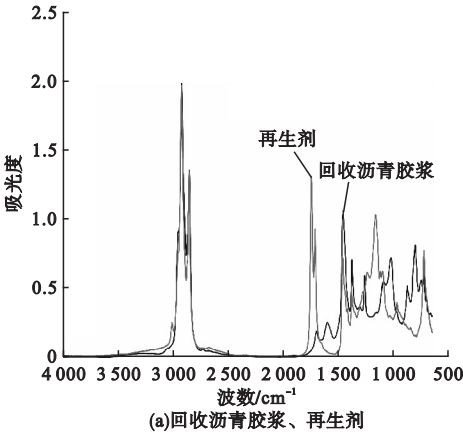
1.3.4 流变性能试验

采用 TA-HR-1 型动态剪切流变仪(DSR), 分别对回收沥青胶浆、再生沥青胶浆进行测试, 选用 25 mm 平行板、间隙(1.00±0.05) mm; 选择控制应力模式进行温度扫描, 测试温度为 46~76 ℃, 间隔为 6 ℃, 应力 100 Pa, 频率为 10 rad/s.

2 结果分析

2.1 再生前后沥青胶浆化学组分变化分析

笔者对再生剂、回收沥青胶浆和再生剂



掺量分别为 8%、9%、10% 的再生沥青胶浆进行了红外光谱测试,测试结果如图 2 所示.

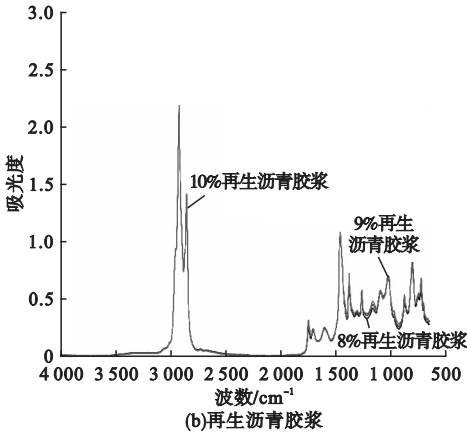


图 2 不同沥青胶浆及再生剂红外光谱

Fig. 2 Fourier transform infrared spectrum of different asphalt mortar and regenant

从图 2(a)可以看出,回收沥青胶浆、再生剂都在  $2\,920\text{ cm}^{-1}$  和  $2\,850\text{ cm}^{-1}$  附近出现 C—H 伸缩振动峰. 回收沥青胶浆在  $1\,700\text{ cm}^{-1}$  处出现较强的脂肪族羧酸 C=O 伸缩振动峰,这是由于沥青发生了氧化导致的. 在  $1\,260\text{ cm}^{-1}$  处出现酮羰基伸缩振动峰,这同样是由于沥青发生了氧化反应形成的. 由于物质间的相互干扰,吸收峰范围会有微量移动<sup>[14]</sup>,笔者抽提回收的沥青中残存极微量的矿粉,故亚砷基位置出现在  $1\,021\text{ cm}^{-1}$  处而亚砷基一般出现  $1\,030\text{ cm}^{-1}$  附近,即亚砷基位置发生了一定的偏移,且在  $1\,021\text{ cm}^{-1}$  附近的亚砷基 S=O 强度明显增强,这是由于沥青发生了硫化反应导致的. 在  $1\,092\text{ cm}^{-1}$  处出现新的峰,查阅波谱表<sup>[15]</sup>可知为矿粉中  $\text{SiO}_2$  的 Si—O—Si 伸缩振动峰;再生剂在  $1\,743\text{ cm}^{-1}$  处有饱和脂肪酸酯 C=O 伸缩振动峰、在  $1\,700\text{ cm}^{-1}$  附近有脂肪族羧酸 C=O 伸缩振动峰、在  $1\,160\text{ cm}^{-1}$  处有  $(\text{CH}_3)_2\text{CHR}$  的 C—C 伸缩振动峰、在  $967\text{ cm}^{-1}$  处有较强的丁二烯 C=C 振动峰. 从图 2(b)可以看出,随着再生剂掺量的增加,再生沥青胶浆在  $2\,920\text{ cm}^{-1}$ 、 $2\,850\text{ cm}^{-1}$

附近的 C—H 伸缩振动峰和  $2\,000\sim 650\text{ cm}^{-1}$  波数的特征峰强度发生了变化. 此外,受再生剂的影响,再生沥青胶浆在  $1\,743\text{ cm}^{-1}$  处出现饱和脂肪酸酯 C=O 伸缩振动峰.

2.2 再生前后沥青胶浆化学组分定量分析

为了定量分析再生前后沥青胶浆化学组分的变化,笔者采用式(1)、式(2)、式(3)中所给的特征官能团的峰面积比计算式对特征官能团峰面积及指数进行了计算,计算结果如表 2、表 3 所示. 从表 3 可以看出,由于沥青在使用过程中发生氧化导致回收沥青胶浆的羰基和亚砷基的特征官能团指数处于较高的水平,这一变化规律与参考文献[16-17]的研究结果具有一致性.  $I_B$  数值表示饱和和分含量的相对大小,它影响着沥青的针入度,表 3 中  $I_B$  数值随着再生剂掺量的增加逐渐增大,这与再生剂本身应具有的作用效果具有一致性,即再生剂的掺入使得回收沥青胶浆得到了软化;老化特征官能团羰基指数  $I_{C=O}$  随着再生剂的加入没有表现出明显的变化规律但总体是降低的,而羰基指数  $I_{S=O}$  随着再生剂的加入逐渐降低,这可能是再生剂



与回收沥青胶浆发生了化学反应使得部分分子重排后的表现.从沥青胶浆的化学组分角度出发,再生剂与回收沥青胶浆发生化学

反应在一定程度上可降低羰基和亚砷基等官能团强度,这与参考文献[18]研究结果一致.

表 2 特征官能团峰面积

Table 2 Peak area of characteristic functional group									
沥青胶浆	再生剂掺量/%	$A_{2920}$	$A_{2850}$	$A_{1743}$	$A_{1700}$	$A_{1260}$	$A_{1092}$	$A_{1021}$	$A_{967}$
回收	—	61.066	17.997	0	2.293	4.569	4.293	13.063	0.176
	8	63.763	19.502	2.367	1.993	3.444	3.062	11.314	0.267
再生	9	63.302	20.132	2.893	2.127	3.280	3.105	9.678	0.318
	10	64.128	19.887	3.546	1.579	2.807	3.105	9.371	0.370

表 3 特征官能团指数

Table 3 Index of characteristic functional group				
沥青胶浆	再生剂掺量/%	$I_B$	$I_{C=O}$	$I_{S=O}$
回收	—	0.927	0.027	0.153
	8	0.937	0.022	0.127
再生	9	0.974	0.025	0.113
	10	1.002	0.019	0.111

2.3 再生前后沥青胶浆流变特性参数分析

为了研究再生前后沥青胶浆流变参数的变化情况,笔者进行了 DSR 的温度扫描.图 3 为再生前后沥青胶浆流变特性参数随温度的变化.图中  $G^*$  是复数剪切模量、 $\delta$  是相位角,分别反应沥青材料黏弹性的指标<sup>[19]</sup>;  $G^*/\sin\delta$  是车辙因子、 $G^*\cdot\sin\delta$  是疲劳因子,分别反应沥青材料抗车辙能力和耐疲劳性能的指标<sup>[20]</sup>.

从图 3 可以看出,回收沥青胶浆的  $G^*$ 、 $G^*/\sin\delta$ 、 $G^*\cdot\sin\delta$  都明显高于再生沥青胶浆,而回收沥青胶浆  $\delta$  则明显低于再生沥青胶浆,即同一加载频率下回收沥青胶浆表现出更好的刚度和抗高温车辙能力但耐疲劳性能不足;再生前后沥青胶浆在相同加载频率下随着加载温度的增加, $G^*$ 、 $G^*/\sin\delta$ 、 $G^*\cdot\sin\delta$  都呈现出减小的趋势,而相位角则呈现出增大的趋势,且回收沥青胶浆的  $G^*$ 、 $G^*/\sin\delta$ 、 $G^*\cdot\sin\delta$  随温度的增加曲线下降幅度巨大,这是由于已经老化的回收沥青胶浆在较低温度

时更多表现为脆性,而随着温度的升高回收沥青胶浆逐渐软化黏性才逐渐体现出来;随着再生剂的掺入,回收沥青胶浆的  $G^*$ 、 $G^*/\sin\delta$ 、 $G^*\cdot\sin\delta$  和  $\delta$  发生明显变化,这表明加入再生剂后回收沥青胶浆的流变性能得到显著改善;此外,在 64~76℃ 内,3 种不同再生剂掺量的再生沥青胶浆  $G^*$  近似相等的情况下, $\delta$  仍有较大差异,即 3 种再生沥青胶浆的刚度基本一致,但弹性与黏性成分比例不一致,再生剂掺量多的沥青胶浆黏性成分比例越高,弹性减弱,相位角更大.

从图 3 还可以看出,再生前后沥青胶浆的  $G^*$ 、 $G^*/\sin\delta$ 、 $G^*\cdot\sin\delta$  的数值变化趋势都一致,与温度之间满足指数型减小的关系:

$$y = ae^{bt}.$$
 (4)

式中: $y$  为复数剪切模量或车辙因子或疲劳因子; $t$  为温度; $a$ 、 $b$  为常数.

而  $\delta$  随温度的增加则呈现出线性增长的关系:

$$\delta = pt + q.$$
 (5)

式中: $p$ 、 $q$  为常数.

加入再生剂后回收沥青胶浆的  $G^*$ 、 $G^*/\sin\delta$  和  $G^*\cdot\sin\delta$  具有一定程度的降低,而相位角  $\delta$  则具有一定程度的增加,即再生沥青胶浆的抗高温车辙能力有一定程度下降但耐疲劳性能得到一定程度的恢复,这与化学组分中老化特征官能团随着再生剂掺量增加而强度逐渐降低的变化具有一致性.

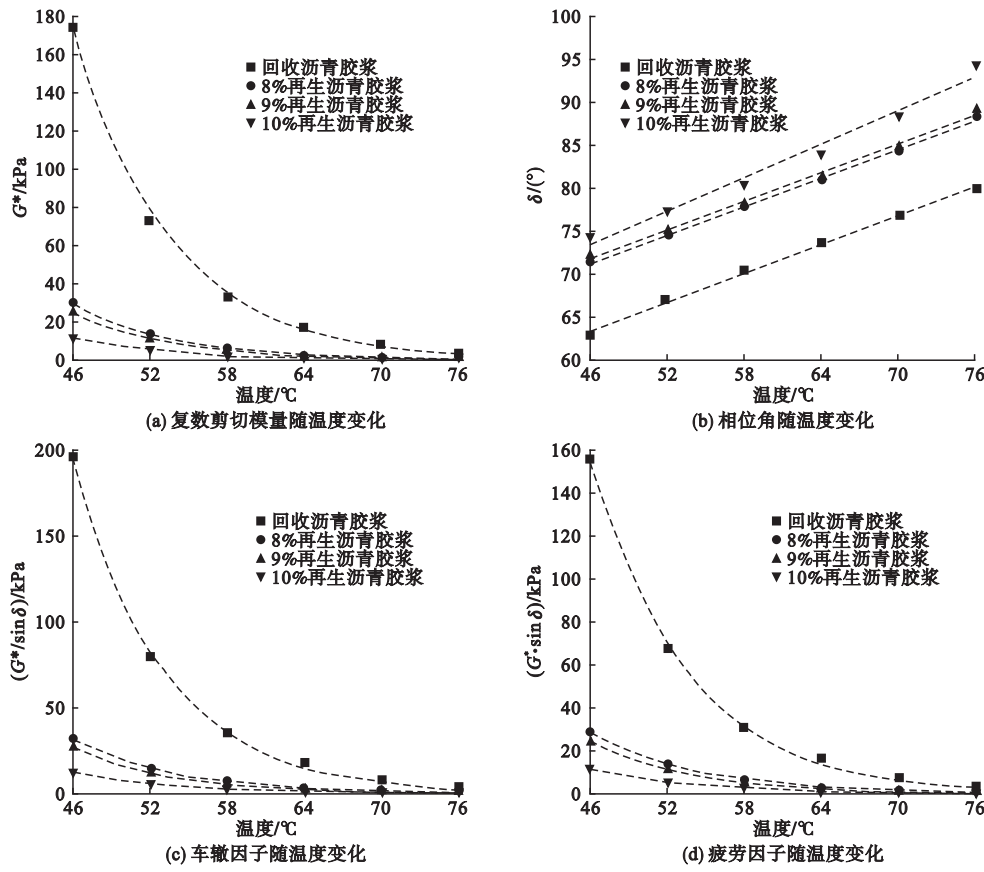


图 3 沥青胶浆流变特性参数随温度的变化

Fig. 3 Variation of rheological properties of asphalt mortar with temperature

3 结 论

(1)通过 FTIR 测试发现回收沥青胶浆在  $1\,260\text{ cm}^{-1}$  处出现酮羰基伸缩振动峰,在  $1\,092\text{ cm}^{-1}$  处出现 Si—O—Si 伸缩振动峰,受再生剂的影响再生沥青胶浆在  $1\,743\text{ cm}^{-1}$  处出现饱和脂肪酸酯  $\text{C}=\text{O}$  伸缩振动峰。

(2)以  $2\,000\sim 650\text{ cm}^{-1}$  波数作为计算基准进行 FTIR 图谱定量分析,随着再生剂掺量的增加  $I_{\text{B}}$  脂肪族官能团指数逐渐增大,  $I_{\text{C=O}}$  羰基指数呈现总体变小的变化,而  $I_{\text{S=O}}$  亚砷基官能团指数逐渐降低。

(3)随着再生剂掺量的增加回收沥青胶浆的复数剪切模量、车辙因子和疲劳因子逐渐降低,而相位角则逐渐增加。

参考文献

[1] 李晓民,魏定邦,姚志杰,等. 再生剂对老化沥

青流变性能和微观结构的影响[J]. 建筑材料学报,2018,21(6):992-999.  
(LI Xiaomin, WEI Dingbang, YAO Zhijie, et al. Effects of rejuvenators on rheological properties and microstructures of aged asphalt [J]. Journal of building materials, 2018, 21(6):992-999.)

[2] 何兆益,冉龙飞,曹青霞. 基于光谱分析的 SBS 改性沥青再生机理研究[J]. 建筑材料学报,2015,18(5):900-904.  
(HE Zhaoyi, RAN Longfei, CAO Qingxia. Mechanism study of recycle of SBS modified asphalt based on spectrum analysis[J]. Journal of building materials, 2015, 18(5):900-904.)

[3] 李君峰. 生物沥青再生沥青结合料使用性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2018.  
(LI Junfeng. Performance evaluation of bioasphalt rejuvenated asphalt binder [D]. Changsha: Hunan University,2018.)

[4] 鄢然. SBS 改性沥青多次再生性能与机理研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.  
(YAN Ran. Study on performance and mechanism of multiple recycled SBS modified asphalt [D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2018.)

[5] 张海涛,宫明阳,孙晓文. 复合再生改性沥青

- 性能的试验研究[J]. 公路, 2018, 63(1): 172-176.  
(ZHANG Haitao, GONG Mingyang, SUN Xiaowen. Research on performance of composite regeneration and modified asphalt[J]. Highway, 2018, 63(1): 172-176.)
- [6] CAVALLI M C, ZAUMANIS M, MAZZA E, et al. Aging effect on rheology and cracking behaviour of reclaimed binder with bio-based rejuvenators[J]. Journal of cleaner production, 2018, 189: 88-97.
- [7] ELKASHEF M, WILLIAMS R C, Cochran E. Investigation of fatigue and thermal cracking behavior of rejuvenated reclaimed asphalt pavement binders and mixtures [J]. International journal of fatigue, 2018, 108: 90-95.
- [8] ZENG M L, LI J F, ZHU W Q, et al. Laboratory evaluation on residue in castor oil production as rejuvenator for aged paving asphalt binder[J]. Construction and building materials, 2018, 193: 276-285.
- [9] GONG M H, YANG J, ZHANG J Y, et al. Physical-chemical properties of aged asphalt rejuvenated by bio-oil derived from biodiesel residue [J]. Construction and building materials, 2016, 105: 35-45.
- [10] 季节, 郭晨伟, 张奥, 等. 紫外老化对废食用植物油再生沥青性能的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(2): 309-314.  
(JI Jie, GUO Chenwei, ZHANG Ao, et al. Study on effect of ultraviolet aging on the properties of waste vegetable oil recycled asphalt [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(2): 309-314.)
- [11] 念腾飞, 李萍, 林梅. 冻融循环下沥青特征官能团含量与流变参数灰熵分析及微观形貌[J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(4): 1045-1054.  
(NIAN Tengfei, LI Ping, LIN Mei. Micro-morphology and gray entropy analysis of asphalt characteristics functional groups and rheological parameters under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Jilin university (engineering and technology edition), 2018, 48(4): 1045-1054.)
- [12] NIAN T F, LI P, MAO Y, et al. Connections between chemical composition and rheology of aged base asphalt binders during repeated freeze-thaw cycles [J]. Construction and building materials. 2018, 159: 338-350.
- [13] 李萍, 念腾飞, 魏定邦, 等. FTIR 定量分析方法与老化沥青流变参数新探[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(2): 34-39.  
(LI Ping, NIAN Tengfei, WEI Dingbang, et al. Quantitative analysis method of FTIR and exploration on rheological parameters of aged asphalt binders [J]. Journal of Huazhong university of science and technology (natural science edition), 2018, 46(2): 34-39.)
- [14] 曹青霞. 基于 SBS 改性沥青的高性能再生剂研发[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.  
(CAO Qingxia. High-performance regenerative agent development based on the SBS modified asphalt [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.)
- [15] 翁诗甫. 傅里叶变换红外光谱分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.  
(WENG Shifu. Fourier transform infrared spectroscopy analysis [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.)
- [16] 林璐, 李晓林, 郑广宇, 等. 石油沥青老化性能与其化学组成的关系新探讨[J]. 材料导报, 2013, 27(16): 123-126.  
(LIN Lu, LI Xiaolin, ZHENG Guangyu, et al. Relationship between aging performance and chemical composition of asphalt[J]. Materials review, 2013, 27(8): 123-126.)
- [17] 李炜光, 段炎红, 颜录科, 等. 利用石油沥青红外光谱图谱特征测定沥青的方法研究[J]. 石油沥青, 2012, 26(4): 9-14.  
(LI Weiguang, DUAN Yanhong, YAN Luke, et al. Study on measuring method of asphalt using infrared spectrum characteristic of petroleum pitch [J]. Petroleum asphalt, 2012, 26(4): 9-14.)
- [18] 姚志杰. 再生剂与老化沥青微观作用机理研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.  
(YAO Zhijie. Study on microscopic mechanism of reguvenator and aged asphalt [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018.)
- [19] LIU J, YAN K Z, YOU L Y, et al. Laboratory performance of warm mix asphalt binder containing polyphosphoric acid [J]. Construction and building materials. 2016, 106: 218-227.
- [20] 季节, 武昊, 索智, 等. THFS 对沥青感温性能的影响分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(3): 475-482.  
(JI Jie, WU Hao, SUO Zhi, et al. Analysis on temperature susceptibility of asphalt binder affected by THFS [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017(3): 475-482.)
- [21] 念腾飞, 李萍, 张国宏, 等. 考虑水-温循环的 SBS 改性沥青复数剪切模量预估模型[J]. 复合材料学报, 2019, 36(2): 533-543.  
(NIAN Tengfei, LI Ping, ZHANG Guohong, et al. Prediction model of complex shear modulus of SBS modified asphalt binder considering water-temperature cycles [J]. Acta materiae compositae sinica, 2019, 36(2): 533-543.)
- (责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)