

文章编号:1007-9629(2022)02-0164-07

## 废机油再生 SBS 改性沥青的性能及机理

崔亚楠<sup>1,2,\*</sup>, 崔树宇<sup>1,2</sup>, 郭立典<sup>3</sup>

(1. 内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古工业大学 内蒙古自治区土木  
工程结构与力学重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051; 3. 内蒙古电力(集团)有限责任公司, 内蒙  
古 鄂尔多斯 010300)

**摘要:**为了研究废机油作为再生剂的可行性以及不同再生剂对老化 SBS 改性沥青的再生效果,通过常规性能试验、动态剪切流变(DSR)试验对 SBS 改性沥青再生后的性能进行评价,采用原子力显微镜(AFM)、傅里叶红外光谱(FTIR)及热重分析(TG)研究了 SBS 改性沥青的再生机理。结果表明:XT-1 再生剂和废机油对老化 SBS 改性沥青的针入度、软化点、延度均有较好的恢复效果;XT-1 再生剂可以提高再生沥青的低温抗裂性能;废机油对老化 SBS 改性沥青疲劳寿命的影响更为明显;废机油对再生沥青黏弹性能有更好的恢复效果,可以改善老化作用对 SBS 改性剂的降解;XT-1 再生剂和废机油的加入都调节了 SBS 老化沥青中的组分,改善了其路用性能,但未发生化学反应。

**关键词:**SBS 改性沥青;废机油;再生机理

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.02.008

## Performance and Mechanism of Waste Oil Recycled SBS Modified Asphalt

CUI Yanan<sup>1,2,\*</sup>, CUI Shuyu<sup>1,2</sup>, GUO Lidian<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;  
2. Key Laboratory of Civil Engineering Structure and Mechanics of Inner Mongolia Autonomous Region, Inner  
Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 3. Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., Ltd.,  
Ordos 010300, China)

**Abstract:** To explore the feasibility of using waste oil as a regenerating agent, the regeneration effect of different regenerating agents on aged SBS modified asphalt was studied. Firstly, the performance of SBS modified asphalt after regeneration was evaluated through conventional performance experiment and dynamic shear rheology (DSR) experiment. Then, the regeneration mechanism of SBS modified asphalt was studied through atomic force microscope (AFM), Fourier infrared spectroscopy (FTIR) and thermogravimetric (TG). The results show that XT-1 regenerant and waste oil can recover the penetration, softening point and ductility of the aged SBS modified asphalt well. XT-1 regenerant can improve the low-temperature crack resistance of recycled asphalt. Waste oil has more obvious influence on the fatigue life of aged SBS modified asphalt and has a better recovery effect on the viscoelasticity of recycled asphalt, which can improve the degradation of SBS modifiers by aging. The addition of XT-1 regenerant and waste oil both adjust the components of the aged asphalt and improve its road performance, and no chemical reaction occurs.

**Key words:** SBS modified asphalt; waste oil; regeneration mechanism

收稿日期:2020-11-01; 修订日期:2021-03-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51568054);内蒙古自治区高等学校“青年科技英才计划”(NJYT-19-A19)

第一作者(通讯作者):崔亚楠(1974—),女,内蒙古乌兰察布人,内蒙古工业大学教授,博士生导师,博士.E-mail: nmgcuianan@163.com

随着道路服役时间的延长,沥青路面出现大量功能性病害与结构性病害,每年养护改造产生了大量的废旧沥青路面材料(RAP).近年沥青路面再生利用技术受到广泛重视,旧沥青的再生成为研究热点之一.Hasan等<sup>[1]</sup>发现,加入废植物油和废机油再生后的老化沥青均降低了C=O和S=O峰面积的强度,这意味着废油可以减少沥青质含量.李汝凯等<sup>[2]</sup>探讨了废机油底渣再生剂对老化沥青低温性能的影响,发现废机油底渣掺量(质量分数)增加到10%时,沥青胶结料的低温极限分级明显提高,性能明显下降.

总体来看,目前大部分关于废机油再生的论文多为混合料路用性能研究或流变性能研究,对废机油再生沥青微观层面的研究仍有不足,并不能将微观与宏观结合起来,共同评价废机油的再生效果.本文以复合老化后的沥青为研究对象,采用废机油和XT-1型再生剂来恢复老化SBS改性沥青的性能,通过三大指标试验及动态剪切流变(DSR)试验,对比2种再生剂对老化SBS改性沥青性能的恢复效果.通过原子力显微镜(AFM)、傅里叶红外光谱(FIR)及热重分析(TG),研究再生前后沥青微观力学性能、官能团的变化及质量损失情况,通过宏微观测试结果共同评价废机油的再生效果,为废机油作为再生剂的研究提供参考依据.

## 1 试验材料和方法

### 1.1 再生剂

废机油为大众捷达家庭用车新车行驶约5 000~6 000 km后换下来的废弃机油.对比再生剂选用常州信拓路面改性材料有限公司生产的XT-1型沥青再生剂.2种再生剂的基本指标见表1.

表1 沥青再生剂的基本指标  
Table 1 Basic indexes of asphalt regenerants

Index	XT-1	Waste oil
60 °C viscosity/(mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	195.0	37.2
Flash point/°C	226	230
15 °C density/(g·cm <sup>-3</sup> )	0.970	0.782

### 1.2 沥青

本文所用原料为SBS改性沥青,基本参数见表2.

#### 1.2.1 老化沥青的制备

热老化沥青采用现行JTGE20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中“T0630”方法以RTFOT+PAV(20 h)制备(PAV老化沥青).紫外老化沥青(UV老化沥青)制备方法为将长期老化后的

表2 SBS改性沥青的基本指标  
Table 2 Basic indexes of SBS modified asphalt

Index	Result	Technical requirement
Penetration(25 °C, 5 s, 100 g)/(0.1 mm)	64	60~80
Penetration index	0.05	> -0.4
Softening point/°C	71.8	> 55
5 °C ductility(5 cm·min <sup>-1</sup> )/cm	44	> 30
Kinematic viscosity(135 °C)/(Pa·s)	2.21	< 3

SBS改性沥青放入紫外老化箱中老化233 h,以模拟室外沥青1 a UV老化,老化温度为50 °C.

#### 1.2.2 再生沥青制备

再生沥青制备方法是将再生剂放入老化沥青中通过搅拌机搅拌均匀,温度为135 °C,搅拌速率为2 000 r/min;搅拌15~20 min后置于110 °C烘箱中静置10 min,然后取出继续搅拌;重复上述过程4~5次,然后静置24 h,使XT-1再生剂或废机油与老化沥青充分融合,得到再生沥青.老化沥青和再生沥青的种类及编号见表3.

表3 沥青的种类及代号  
Table 3 Types and codes of asphalts

Asphalt type	$\omega$ (regenerant)/%	Code
Aged asphalt+XT-1	4	A
	8	B
	12	C
	16	D
Aged asphalt+waste oil	3	E
	5	F
	7	G
	9	H
Aged asphalt	0	O

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 三大指标试验

针入度、软化点、延度按照JTGE20—2011中的“T0624—2011”、“T0605—2011”、“T0606—2011”执行,针入度和延度分别选取25、10 °C作为试验温度.

#### 1.3.2 动态剪切流变试验

采用DHR-1动态流变剪切仪的线性振幅扫描(LAS)试验,按照AASHTO-TP 101-12(2015)《Standard method of test for estimating fatigue resistance of asphalt binders using the linear amplitude sweep》中的试验方法对原样沥青、老化沥青和再生沥青的疲劳性能进行测试.试验温度选取28 °C.

### 1.3.3 微观分析试验

采用AFM、FTIR及TG对原样沥青、老化沥青和再生沥青的微观力学特性、官能团变化及质量损失进行观察和测试。AFM扫描模式选用Peak Force QNM模式,扫描面积为 $15\ \mu\text{m}\times 15\ \mu\text{m}$ ,像素为 $512\times 512$ ,于室温下观测。采用的扫描模式QNM是Bruker公司基于AFM的峰值力轻敲模式推出的专利技术,可获得微纳米尺度相态的杨氏模量(DMT)、黏附力<sup>[3]</sup>。FTIR分辨率为 $4\ \text{cm}^{-1}$ ,扫描次数为32次,测试范围 $4\ 000\sim 650\ \text{cm}^{-1}$ ,仪器的温度控制在 $17\sim 27\ ^\circ\text{C}$ 且保持干燥。TG试验升温速率为 $10\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ ,升温范围为 $30\sim 900\ ^\circ\text{C}$ 。

## 2 宏观试验结果与讨论

### 2.1 三大指标结果分析

图1~3为3种沥青的针入度、延度和软化点测试结果。以原样沥青的三大指标作为参考线,如图1~3中上方的黑线所示。由图1~3可见:不同老化程度SBS改性沥青中添加再生剂后,针入度和软化点改变明显,2种老化方式后再生的沥青均达到原样水平,且废机油再生至原样沥青水平所需掺量明显低于XT-1再生剂,说明废机油对针入度、软化点的恢复要优于XT-1再生剂;延度的恢复废机油弱于XT-1再生剂,这是由于XT-1再生剂含有增塑剂,可以增强再生沥青的低温抗裂性能,而废机油虽作为轻质油,可以补充老化沥青中的芳香分,通过调整其化学组成及含量来恢复其低温延展性,却无法修复SBS改性沥青老化时部分降解的分子链<sup>[4]</sup>;再生SBS改性沥青的延度值未达到原样沥青水平,这与SBS改性沥青的结构密切相关,在 $10\ ^\circ\text{C}$

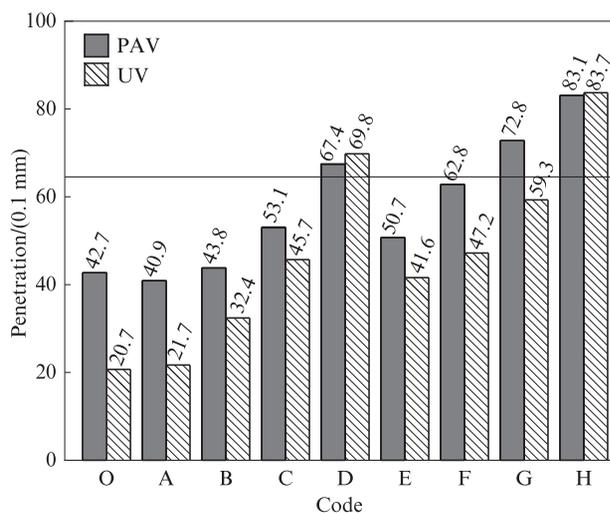


图1 沥青的针入度

Fig. 1 Penetration of asphalts

下,由于SBS自身分子的空间网络结构以及沥青间的黏摩阻力,制约了沥青本身的变形能力,使延度无法恢复。

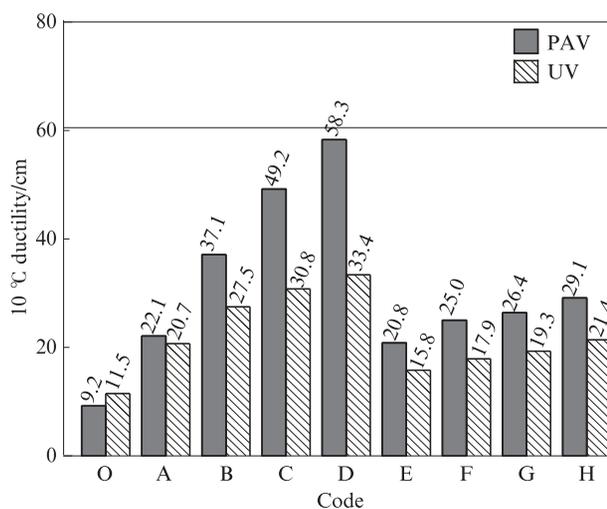


图2 沥青的延度

Fig. 2 Ductility of asphalts

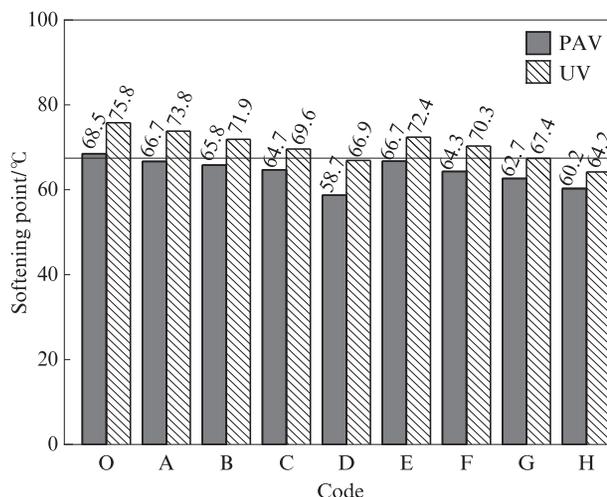


图3 沥青的软化点

Fig. 3 Softening point of asphalts

### 2.2 基于DSR试验的再生沥青疲劳寿命分析

对SBS改性沥青原样及老化再生后的SBS改性沥青进行LAS试验,根据AASHTO-TP 101计算得到VECD模型的各个参数<sup>[5]</sup>,结果如表4所示。其中: $\alpha$ 为频率扫描拟合的参数; $C_1$ 、 $C_2$ 为幅度扫描的拟合参数; $D_i$ 为发生破坏时的 $D(t)$ 值; $K=1+(1-C_2)\cdot\alpha$ ; $B=2\alpha$ ; $A=fD_i/K(\pi C_1 C_2)^e$ 。原样SBS改性沥青、PAV老化SBS改性沥青、16%XT-1再生PAV老化SBS改性沥青和9%waste oil再生PAV老化SBS改性沥青等4种沥青在不同应变下的疲劳寿命如表5所示。由表4、5可见:4种沥青的疲劳寿命均随着应变水平的提高急剧减小,以原样SBS改性沥青为例,其应变

为3%时的疲劳寿命高达61 383次,当其应变为10%时,疲劳寿命仅为274次;PAV老化沥青的疲劳寿命显著降低,随着再生剂的掺入,沥青的疲劳寿命得到一定程度的恢复及延长,这表明再生剂增大了沥青

的柔性,使再生沥青的疲劳寿命增加<sup>[6]</sup>;掺入9%废机油再生沥青的疲劳寿命远高于掺加16%XT-1的再生沥青,说明废机油对再生沥青疲劳寿命的影响更为显著。

表4 不同沥青的LAS试验模型参数  
Table 4 LAS test model parameters of different asphalts

Asphalt type	$\alpha$	$C_1$	$C_2$	$D_f$	$K$	$B$	$A$
Original	2.246	0.047	0.516	61.564	2.087	4.493	8 542 120
PAV	2.253	0.055	0.537	46.932	2.042	4.506	2 675 611
PAV+16%XT-1	2.269	0.606	0.027	62.250	1.893	4.539	568 000 000
PAV+9%waste oil	2.581	0.081	0.390	146.272	2.574	5.160	10 755 875

表5 4种沥青在不同应变水平下的疲劳寿命  
Table 5 Fatigue life of four kinds of asphalt under different strain levels

Strain level/%	times			
	Original	PAV	PAV+16%XT-1	PAV+9%waste oil
1	8 542 120	2 675 611	10 755 874	568 000 000
3	61 383	18 950	73 482	1 956 597
6	2 726	834	3 161	54 626
9	441	134	502	6 734
10	274	83	311	3 909

### 3 再生沥青的微观力学及红外光谱特征研究

#### 3.1 老化和原样沥青的杨氏模量及黏附力

采用杨氏模量(DMT)与黏附力2个指标进行力学特性的分析.DMT可用于评价沥青黏弹性能的变化,黏附力可用于评价沥青-集料界面的黏附性能.表6为SBS改性沥青老化前后的DMT和黏附力.由表6可知:老化导致SBS改性沥青的DMT上升,黏附力下降.由此可见,随着老化程度的加深,沥青微观表面DMT增大而黏附力减小,进一步说明老化促进了沥青内部黏性成分向弹性成分的转变,提高了沥青的弹性.

表6 SBS改性沥青老化前后的DMT和黏附力  
Table 6 DMT and adhesion before and after aging of SBS modified asphalt

Asphalt type	DMT/MPa	Adhesion/nN
Original	879.9	5.4
PAV	1 283.6	4.2
UV	1 151.5	3.2

对不同再生剂掺量下SBS改性沥青的DMT和黏附力进行计算,得到再生SBS改性沥青的整体DMT与黏附力,结果如表7所示.由表7可见:随着再生剂掺量的增加,再生SBS改性沥青的DMT随之

减小;2种老化方式下,废机油再生沥青的DMT随着再生剂掺量的增加而下降的幅度更大,说明废机油对再生沥青黏弹性能有较好的恢复,这是因为废机油可以恢复老化沥青对SBS改性剂的降解,且对于沥青中的沥青质有较好的分散溶解能力;PAV老化下XT-1再生沥青在掺量为4%时的DMT大于PAV老化沥青,这是因为SBS改性剂在热氧老化过程中会不断分解,虽然部分被氧化成极性大分子后在高温下挥发,但由于老化使沥青表面变硬,阻碍了SBS改性剂的热氧老化,使SBS改性剂降解为小分子<sup>[7]</sup>,所以XT-1再生剂在较低掺量下不能很好地融合SBS改性剂的小分子,出现DMT先增加后减小的现象;从黏附力变化来看,2种再生剂掺量增加时黏附力呈现增长趋势,但增加幅度并不明显,不同掺量再生沥青黏附力之间的差别较小,因此需结合其他性能指标,如DMT和复模量等来综合判断再生SBS改性沥青的再生情况.

同时不同的老化方式对再生沥青的微观力学性能也会产生很大影响.经过UV老化后,利用废机油再生的SBS改性沥青,其3%掺量时的DMT明显高于经过PAV老化后再生的沥青.这种现象产生的原因是SBS改性剂经过长期老化破坏后产生的大分子在紫外光照射下发生裂解降为小分子<sup>[8]</sup>,同时随着老化时间的延长,沥青质含量增加<sup>[9]</sup>,同样掺量下的DMT更难恢复到初始状态,导致微观力学表现为UV老化后再生沥青的DMT在掺量为3%时的恢复效果弱于PAV老化后再生的沥青.

#### 3.2 红外光谱特征分析

图4为再生剂及UV老化再生SBS改性沥青的FTIR图谱.由图4可见:(1)SBS改性沥青再生前后在2 919、1 455  $\text{cm}^{-1}$ 处出现了最大值.其中2 919  $\text{cm}^{-1}$ 的强吸收峰为C-H的伸缩振动特征峰,1 599  $\text{cm}^{-1}$ 的吸收峰是烯烃C=C和C=O的伸缩振动,1 455  $\text{cm}^{-1}$

表7 再生沥青DMT和黏附力汇总  
Table 7 Summary of DMT and adhesion of regenerating SBS modified asphalt

Regenerant	$w(\text{regenerant})/\%$	PAV + regenerant		UV + regenerant	
		DMT/MPa	Adhesion/nN	DMT/MPa	Adhesion/nN
XT-1	4	1 575.65	3.10	673.80	6.85
	8	1 173.40	3.15	637.80	6.90
	12	457.60	4.10	532.80	6.50
	16	449.56	3.95	308.15	6.90
Waste oil	3	253.90	6.20	621.50	5.40
	5	234.25	6.40	415.10	5.20
	7	173.45	6.10	139.10	7.45
	9	90.10	7.00	82.90	6.50

的特征峰为C—H键的变形振动,1 375  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰是脂肪族—CH<sub>3</sub>—和—CH<sub>2</sub>—面内的C—H弯曲振动,1 030  $\text{cm}^{-1}$ 附近为S=O的伸缩振动,996~700  $\text{cm}^{-1}$ 的4个小峰是芳香族分子的特征峰<sup>[10]</sup>。(2)不同再生剂再生沥青的FTIR图谱较原沥青并未出现新的特征吸收峰,这说明再生剂的添加并没有使沥青产生新的物质<sup>[11]</sup>。(3)2种再生剂的FTIR图谱中均出现—CH<sub>3</sub>—和—CH<sub>2</sub>—面内的C—H弯曲振动的吸收峰(1 376  $\text{cm}^{-1}$ 附近),这说明XT-1再生剂和废机油中均含有非极性的甲基和亚甲基以及烷烃和脂肪族。不同的是,XT-1再生剂的FTIR图谱中具有高强度的苯环取代弯曲振动峰(730~690  $\text{cm}^{-1}$ ),这表明XT-1再生剂的主要成分为富含芳烃的轻质组分,而废机油的FTIR图中芳香族分子特征峰较少。

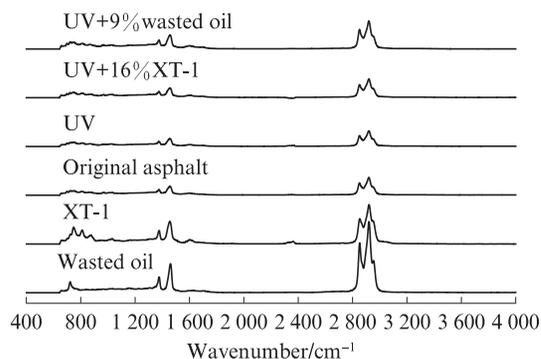


图4 再生剂及紫外老化再生SBS改性沥青的FTIR图谱

Fig. 4 FTIR spectra of SBS modified asphalt regenerated by regenerant and ultraviolet aging

为了进一步对比分析沥青再生前后官能团的变化,引入亚砷基指数(SI)、羰基指数(CI)和丁二烯指数(BI),来定量分析SBS改性沥青的再生。其计算公

式<sup>[12]</sup>如下:

$$CI = \frac{A_{C=O}}{A_{C-H}} \quad (1)$$

$$SI = \frac{A_{S=O}}{A_{C-H}} \quad (2)$$

$$BI = \frac{A_{C=C}}{A_{C-H}} \quad (3)$$

式中: $A_{C=O}$ 为羰基吸收峰面积; $A_{S=O}$ 为亚砷吸收峰面积; $A_{C=C}$ 为丁二烯中C=C键吸收峰面积; $A_{C-H}$ 为饱和C—H键弯曲振动吸收峰面积。

对再生沥青的SI、CI和BI进行计算可得表8。由图4和表8可见:SBS改性沥青经过UV老化后,1 599  $\text{cm}^{-1}$ 处存在—C=C—的吸收峰,相比原样沥青,其CI有所增加,这是由于沥青质的增加导致的<sup>[13]</sup>;1 030  $\text{cm}^{-1}$ 处SI经过UV老化后升高,这说明老化导致SBS改性沥青的—CH<sub>2</sub>—、—CH<sub>3</sub>—含量发生变化,这是因为老化过程中很多短链碳氢化合物发生了加成、聚合反应<sup>[14]</sup>;再生沥青的CI和SI要高于原样SBS改性沥青,这是因为沥青再生技术并非是发生了化学反应的逆反应,并不能使老化后产生的C=O和S=O还原成C—H和S—H<sup>[15]</sup>;966  $\text{cm}^{-1}$ 处的特征峰为SBS改性沥青中丁二烯所具有的,可以反映SBS改性沥青的老化情况,SBS改性沥青经紫外老化后的BI降低,老化后SBS中丁二烯为代表的SBS改性剂发生降解,沥青各组分分子之间交联作用作用减弱,三维的网状结构发生了破坏<sup>[16]</sup>;加入废机油后BI上升并接近原样沥青,由此说明废机油的掺入很好的改善了老化作用对SBS改性剂的降解,使SBS改性沥青内部重新形成完整的网格结构<sup>[4]</sup>。

表8 UV老化及添加再生剂和废机油再生SBS改性沥青的CI,SI,BI  
Table 8 CI, SI, BI of UV aging and regenerated SBS modified asphalt with regenerant and waste engine oil

Asphalt type	CI	SI	BI
Original	0.034	0.017	0.051
UV	0.055	0.041	0.034
UV+16%XT-1	0.063	0.025	0.031
UV+9%waste oil	0.059	0.034	0.050

### 3.3 热重分析

本文选取质量损失为5%及50%时的温度来判断不同沥青热稳定性的差异,表9为不同沥青的热分解温度.由表9可见:原样沥青的分解温度大于老化和再生沥青,不同老化方式也会对沥青的热稳定性有一定影响,但影响不大;再生剂的掺入会使再生沥青的热分解温度降低且废机油再生沥青的分解温度高于XT-1再生沥青;结合FTIR分析可知,再生剂的加入提高了再生沥青中轻质组分的含量,而轻质组分的含量会对沥青前期的热稳定性能有较大影响<sup>[17]</sup>,导致再生沥青的热分解温度降低;结合宏观试验分析,沥青老化后沥青质增加,轻质组分减少,使沥青变硬,再生剂的掺入提高了沥青中轻质组分的含量,重新调和沥青组分,从而使沥青性能恢复.

表9 不同沥青的热分解温度  
Table 9 Thermal decomposition temperatures of different asphalts

Asphalt type	5% mass loss	50% mass loss
Original	303.55	436.20
PAV	294.17	434.34
UV	303.53	438.70
PAV+16%XT-1	278.49	428.69
PAV+9%XT-1	288.50	433.71
UV+16%XT-1	278.47	425.37
UV+9%XT-1	283.50	431.19

## 4 结论

(1)废机油及XT-1再生剂对老化SBS改性沥青针入度、软化点均有较好的恢复效果,延度恢复具有一定局限性.废机油对再生SBS改性沥青疲劳寿命的影响更为明显.

(2)沥青中加入废机油及XT-1再生剂均可使其DMT降低并提高其微观黏附力,再生剂和废机油的掺入提高了老化SBS改性沥青的丁二烯指数,重新调和了老化沥青内部的组分分布,改善了老化沥青

的路用性能,其中废机油作用更为显著.2种再生剂的加入都使老化沥青中的轻组分含量提高,但并未发生化学反应生成新的物质.废机油再生沥青的热稳定性要优于XT-1再生沥青.

(3)废机油作为再生剂对SBS改性沥青有较好的性能恢复,将其作为再生剂具有可行性.在实际工况中,XT-1再生沥青的低温抗裂性能要优于废机油再生沥青,更适宜在10℃以下的温度区域内使用.

### 参考文献:

- [1] HASSAN A, TABATABAEE & TODD L, KURTH. Analytical investigation of the impact of a novel bio-based recycling agent on the colloidal stability of aged bitumen[J]. Road Materials and Pavement Design, 2017:1304257.
- [2] 李汝凯,丁海波,孙潜.废机油底渣再生剂对老化沥青低温性能影响[J].建筑材料学报,2020,23(3):657-663.  
LI Rukai, DING Haibo, SUN Qian. Influence of waste engine oil bottom residue regenerant on low temperature performance of aged asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(3): 657-663. (in Chinese)
- [3] 王明,刘黎萍.纳观尺度沥青相态力学特性老化行为[J].交通运输工程学报,2019,19(6):1-13.  
WANG Ming, LIU Liping. Aging behavior of nanoscale asphalt phase state mechanical properties[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(6):1-13. (in Chinese)
- [4] 王全磊,蒋方听,吉鑫.再生剂对老化SBS改性沥青性能的影响研究[J].公路交通技术,2017,33(6):27-31.  
WANG Quanlei, JIANG Fangting, JI Xin. Study on the influence of regenerating agent on the performance of aged SBS modified asphalt[J]. Highway and Transportation Technology, 2017, 33(6):27-31. (in Chinese)
- [5] 严江.高粘度改性沥青研制及评价方法研究[D].西安:长安大学,2019.  
YAN Jiang. Research on the development and evaluation method of high viscosity modified asphalt[D]. Xi'an:Chang'an University, 2019. (in Chinese)
- [6] 刘朝晖,高新文,翟龙,等.再生沥青中新旧沥青扩散特性[J].长安大学学报(自然科学版),2018,38(5):18-24.  
LIU Zhaohui, GAO Xinwen, ZHAI Long, et al. Diffusion characteristics of new and old asphalt in recycled asphalt[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science), 2018, 38(5): 18-24. (in Chinese)
- [7] 杨震,张肖宁,虞将苗.沥青老化前后微观与宏观力学性能的对比较研究[J].建筑材料学报,2018,21(2):335-339.  
YANG Zhen, ZHANG Xiaoning, YU Jiangmiao. Comparative study of micro and macro mechanical properties of asphalt before and after aging[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2): 335-339. (in Chinese)
- [8] 姚晓光,张万磊,张争奇,等.老化SBS改性沥青二次改性再生工艺及机理研究[J].材料导报,2017,31(24):79-85.

- YAO Xiaoguang, ZHANG Wanlei, ZHANG Zhengqi, et al. Research on the secondary modified regeneration process and mechanism of aging SBS modified asphalt[J]. Materials Reports, 2017, 31(24):79-85. (in Chinese)
- [ 9 ] PENG C, DAI J, YU J, et al. Intercalation of p-methycinnamic acid anion into Zn-Al layered double hydroxide to improve UV aging resistance of asphalt[J]. Aip Advances, 2015, 5(2):1113.
- [10] 崔亚楠,郭立典,陈东升.SBS改性沥青的复合老化机理[J].建筑材料学报,2020,23(5):1183-1191.
- CUI Yanan, GUO Lidian, CHEN Dongsheng. Composite aging mechanism of SBS modified asphalt [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(5):1183-1191. (in Chinese)
- [11] 李立寒,张明杰,祁文洋.老化SBS改性沥青再生与机理分析[J].长安大学学报(自然科学版),2017,37(3):1-8.
- LI Lihan, ZHANG Mingjie, QI Wenyang. Regeneration and mechanism analysis of aged SBS modified asphalt[J].Journal of Chang'an University (Natural Science), 2017, 37(3):1-8. (in Chinese)
- [12] 赵永利,顾凡,黄晓明.基于FTIR的SBS改性沥青老化特性分析[J].建筑材料学报,2011,14(5):620-623.
- ZHAO Yongli, GU Fan, HUANG Xiaoming. Analysis of aging characteristics of SBS modified asphalt based on FTIR[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(5):620-623.(in Chinese)
- [13] 杨兴,邱天,程健,等.SBS改性沥青紫外老化研究[J].化学与生物工程,2013,30(10):68-71,76.
- YANG Xing, QIU Tian, CHENG Jian, et al. Study on UV aging of SBS modified asphalt[J].Chemical and Biological Engineering, 2013,30(10):68-71,76.(in Chinese)
- [14] 诗甫,徐怡庄.傅里叶变换红外光谱[M].北京:化学工业出版社,2016:1.
- SHI Fu, XU Yizhuang. Fourier transform infrared spectroscopy [M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2016:1.(in Chinese)
- [15] 丁婕.道路沥青五次老化再生微观分析[D].长沙:湖南科技大学,2015.
- DING Jie. Microscopic analysis of five-time aging regeneration of road asphalt [D]. Changsha: Hunan University of Science and Technology, 2015.(in Chinese)
- [16] 王涛,才洪美,张玉贞.SBS改性沥青机理研究[J].石油沥青,2008,22(6):10-14.
- WANG Tao, CAI Hongmei, ZHANG Yuzhen. Research on the mechanism of SBS modified asphalt [J]. Petroleum Asphalt, 2008, 22(6):10-14. (in Chinese)
- [17] 李晓东.沥青及各组分热重分析[J].山西建筑,2019,45(14):80-82.
- LI Xiaodong. Thermogravimetric analysis of asphalt and its components[J]. Shanxi Architecture, 2019, 45(14):80-82. (in Chinese)