

# 基于SBS结构修复的再生沥青性能及机理研究

冯新军<sup>1</sup>, 杨洪阳<sup>1</sup>, 肖洪海<sup>1</sup>, 朱自强<sup>2</sup>

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:**目前中国处理老化的SBS改性沥青时,一般采用普通沥青再生剂,但它无法修复SBS交联网状结构,导致老化SBS改性沥青再生效果较差。因此,该研究采用一种含有结构修复剂、萃取油、增塑剂、增溶剂和少量SBS的新型反应型再生剂对老化SBS改性沥青进行再生。通过三大指标试验、布氏黏度试验、动态剪切流变试验和低温弯曲流变试验对再生SBS改性沥青的常规性能和流变性能进行研究。同时,借助荧光显微镜和红外光谱仪对再生SBS改性沥青的再生机理进行研究。结果表明:掺入反应型再生剂后,老化SBS改性沥青的各项常规性能都能得到恢复,使再生SBS改性沥青常规性能达到最佳的再生剂掺量为10%。在最佳再生剂掺量下,再生SBS改性沥青常规性能指标满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)中I-D级SBS改性沥青的技术要求。老化SBS改性沥青经再生后,SBS颗粒明显增多且分布较均匀,交联网状结构得到一定程度的恢复。再生剂中的环氧基团与老化SBS改性沥青的羧基发生聚合反应生成酯类化合物,将断裂的SBS分子链连接起来。

**关键词:**SBS改性沥青;反应型再生剂;常规性能;流变性能;SBS结构修复

中图分类号:U414

文献标志码:A

## Properties and Mechanism of Reclaimed Asphalt Based on SBS Structure Repair

FENG Xinjun<sup>1</sup>, YANG Hongyang<sup>1</sup>, XIAO Honghai<sup>1</sup>, ZHU Ziqiang<sup>2</sup>

(1.School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China;

2.School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

**Abstract:** At present, the common asphalt regenerant is used for treating the aged styrene-butadiene-styrene (SBS) modified asphalt in China, which fails to repair the SBS cross-networking structure, resulting in the poor regeneration effect of the aged SBS modified asphalt. In this study, a new reactive regenerator containing a structural repair agent, extractive oil, plasticizer, solubilizer, and a small amount of SBS was used to regenerate the aged SBS modified asphalt. The conventional properties and rheological properties of reclaimed SBS modified asphalt were studied by three index tests, Brookfield viscosity test, dynamic shear rheological test, and low temperature bending rheological test. Then, a fluorescence microscope and infrared spectrometer were used to study the regeneration mechanism of the reclaimed SBS modified asphalt. The results show that the conventional properties of the aged SBS modified asphalt can be restored after the addition of the reactive regenerant, and the regenerant content for achieving the optimal conventional properties of the reclaimed SBS modified asphalt is 10%. Under the optimal regenerant content, the conventional property indexes of the reclaimed SBS modified asphalt meet the technical requirements of Class I-D SBS modified asphalt in the *Technical Specifications for Construction of Highway Asphalt Pavements* (JTGF40—2004). After the aged SBS modified asphalt is regenerated, the SBS particles increase significantly and are distributed evenly, and the cross-networking structure is restored to a certain extent. The epoxy group in the regenerant polymerizes with the carboxyl group in the aged SBS modified asphalt to generate ester compounds and connect the broken SBS molecular chains.

收稿日期:2024-06-28(修改稿)

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(编号:2021JJ30709);长沙市自然科学基金资助项目(编号:kq2007029)

作者简介:冯新军,男,博士,教授.E-mail:fxjasphalt@aliyun.com

**Keywords:** SBS modified asphalt; reactive regenerant; conventional properties; rheological properties; SBS structure repair

## 0 引言

20世纪90年代以来,SBS改性沥青以其优良的高温稳定性、低温抗裂性和耐疲劳性等路用性能广泛应用于中国高等级沥青路面中。但随着路面使用年限的增加,SBS改性沥青受阳光、空气、温度和雨水等外界环境因素的影响逐渐老化,导致沥青路面产生裂缝、车辙和坑槽等病害<sup>[1-3]</sup>。许多早期建成的SBS改性沥青路面已严重损坏,导致每年都会产生大量废弃的SBS改性沥青混合料。如果这些废旧材料搁置不用,不仅会长期占用大量空间造成资源浪费,还会对环境产生严重污染。因此,废旧沥青路面的再生利用成为中国公路建设可持续发展新的战略重点<sup>[4-5]</sup>。

近年来,国内外学者对老化SBS改性沥青的再生技术进行了较多研究。陈静云等<sup>[6]</sup>认为在SBS改性沥青的老化过程主要发生氧化反应,沥青再生的过程既是对组分进行调节恢复的过程,也是建立新化学平衡的阶段;何兆益等<sup>[7]</sup>、谢远光等<sup>[8]</sup>研究表明:再生剂加入老化SBS改性沥青后,沥青质与软沥青之间会形成一层界面膜,能够促进链段间或者聚合物大分子间的运动,起到润滑及增溶作用,从而使老化沥青的黏度减小,流变性能恢复,低温变形能力增强;李立寒等<sup>[9]</sup>研究表明:在老化SBS改性沥青中掺入基质沥青或再生剂之后,老化SBS改性沥青中沥青质和羰基含量减少,胶质和轻质组分含量增大,针入度和延度增大,但SBS与基质沥青间的交联作用无法恢复;Sun等<sup>[10]</sup>研究表明:SBS改性沥青老化过程中基质沥青的老化与SBS分子降解同时发生,要达到良好的再生效果,不仅要加入轻质油来改善沥青胶体结构,还要加入改性成分将断裂的网络结构恢复,如添加SBS改性剂;Liu等<sup>[11]</sup>从使用多年的路面表层中抽出老化SBS改性沥青,加入高标号的软沥青或新的SBS改性沥青进行再生,结果表明加入新的SBS改性沥青再生效果要优于加入普通沥青,其原因是SBS改性沥青从物理上补充了断裂的网络结构;Wei等<sup>[12]</sup>采用含有芳烃油和SBS聚合物的再生剂进行再生,结果表明芳烃油对老化沥青结合料

有很强的软化作用,能够较好地提升低温性能,但其高温性能变差;Wang等<sup>[13]</sup>将一种由桐油制备的复合再生剂加入老化SBS改性沥青中进行再生,结果表明桐油复合再生剂对沥青流变性能和抗老化性能的再生效果均优于单一桐油再生剂;崔亚楠等<sup>[14]</sup>采用废机油对老化SBS改性沥青进行再生,结果表明废机油的加入调节了老化SBS改性沥青中的组分,改善了其路用性能,但并未发生化学反应;畅润田等<sup>[15]</sup>自行研制了一种废弃植物油基再生剂,自制再生剂比市购再生剂对老化SBS改性沥青高低温性能具有更优的改善效果。

综上所述,目前对老化SBS改性沥青进行再生的主要方式是采用普通再生剂调节老化基质沥青的组分比例并改善其胶体结构,但不能修复已破坏的SBS聚合物网络结构,所以老化SBS改性沥青的再生效果较差<sup>[16-19]</sup>。另外,目前对老化SBS改性沥青网络结构进行恢复的主要方式是向其添加新的SBS改性剂或新的SBS改性沥青,但这种方式不仅不能利用老化的SBS改性剂,还会由于SBS改性剂含量过多导致再生SBS改性沥青的相容性差。因此,本文采用自行研发的反应型再生剂对老化SBS改性沥青组分进行调节的同时对SBS网络结构进行修复,以实现SBS改性沥青性能的全面恢复。首先通过三大指标试验、布氏黏度试验和流变试验对其常规性能和流变性能进行研究;然后,采用荧光显微镜和红外光谱仪对再生SBS改性沥青的微观结构和化学官能团进行分析并研究其再生机理。

## 1 原材料与试验方法

### 1.1 原材料

#### 1.1.1 沥青

选用西太70<sup>#</sup>A级石油沥青和SBS改性剂(线形YH-791)制备SBS改性沥青。姚晓光等<sup>[20]</sup>研究表明:采用旋转薄膜烘箱加热(RTFOT)5 h获得SBS改性沥青指标与服务年龄为7年的SBS改性沥青一致。因此,本研究采用5 h的RTFOT试验模拟SBS改性沥青的长期老化。SBS改性沥青老化前后的主要技术指标如表1所示,其中原样SBS改性沥青技术

指标符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)(以下简称《规范》)中聚合物改性沥青 SBS 类 I-D 的要求。

表 1 老化前后 SBS 改性沥青主要技术指标

Table 1 Main technical indexes of SBS modified asphalt before and after aging

项目	针入度 (25℃)/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	延度 (5℃)/ cm	布氏黏度 (135℃)/ (Pa·s)
原样 SBS 改性沥青	51.9	70.0	23.5	2.440
老化 SBS 改性沥青	22.8	75.3	0.4	3.670
SBS 类 I-D 技术要求	40.0~60.0	≥60.0	≥20.0	≤3.000

### 1.1.2 再生剂

采用基础油分、增塑剂、结构修复剂、增溶剂和少量 SBS 改性剂制成反应型再生剂,其主要技术指标见表 2。其中,基础油分选用伊朗进口抽出油,增塑剂选用邻苯二甲酸二辛酯(DOP),结构修复剂选用环氧材料,增溶剂选用 C9 石油树脂,SBS 改性剂选用 YH-791SBS。

表 2 反应型再生剂的主要技术指标

Table 2 Main technical indexes of reactive regenerative

项目	单位	实测值	规范要求
60℃黏度	mm <sup>2</sup> /s	9 280	4 501~12 500
闪点	℃	238	≥220
饱和分	%	24.46	≤30.00
芳香分	%	44.58	实测记录
TFOT 前后的黏度比	%	2.16	≤3.00
TFOT 前后质量变化	%	-1.820	[-3,3]

选取增塑剂掺量、SBS 改性剂掺量、结构修复剂和 C9 石油树脂掺量 4 个因素,通过四因素四水平正交试验和极差分析法,研究各因素对再生 SBS 改性沥青(再生剂掺量为 10%)的针入度、软化点、5℃延度及 135℃黏度的影响,确定再生剂各组分比例为 100%抽出油:35%增塑剂:30%SBS 改性剂:55%结构修复剂:6%C9 石油树脂。

再生剂的制备工艺如下:称取 100 质量份的抽出油加热到 140℃,然后将 35 质量份的增塑剂和 6 质量

份的 C9 石油树脂加入抽出油内并搅拌均匀,再加入 30 质量份的 SBS 改性剂,在 150℃下保温 30 min,使其充分溶胀后置于高速剪切机下,在 160~180℃下以 3 500 rpm 剪切速率高速剪切 30 min,取出后在 140℃下加入 55 质量份的结构修复剂以 300 rpm 转速搅拌 20 min,最终制得反应型再生剂。反应型再生剂的主要技术指标如表 2 所示,符合《公路沥青路面再生沥青技术规范》(JTG/T 5521—2019)RA-75 的要求。

### 1.1.3 再生 SBS 改性沥青的制备

再生 SBS 改性沥青的制备工艺如下:称取 100 质量份的老化 SBS 改性沥青加热到 150℃,然后分别将 6、8、10、12、14、16 质量份的反应型再生剂加入到老化 SBS 改性沥青中,在 150℃条件下以 300 rpm 的转速搅拌 20 min,即制得 6%、8%、10%、12%、14%、16% 的再生 SBS 改性沥青。

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 常规性能试验

(1) 三大指标试验。针入度、软化点、延度试验按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)(以下简称《规程》)中“T0624—2011”“T0605—2011”“T0606—2011”执行,针入度试验温度为 25℃,延度试验温度为 5℃。

(2) 布氏黏度试验。布氏黏度试验按照《规程》中“T0624—2011”执行,试验温度为 135℃。

### 1.2.2 流变性能试验

(1) 动态剪切流变(DSR)试验。采用奥地利 Anton Paar 公司的 MCR 302 型高级流变仪按照《规程》中“T0628—2011”试验方法对原样 SBS 改性沥青、老化 SBS 改性沥青和再生 SBS 改性沥青进行温度扫描(温度区间为 58~88℃),采用应变控制模式,转动频率固定为 10 rad/s,沥青试样直径 25 mm、厚度 1 mm。

(2) 低温弯曲流变(BBR)试验。采用弯曲梁流变仪按照《规程》中“T0627—2011”试验方法对原样 SBS 改性沥青、老化 SBS 改性沥青和再生 SBS 改性沥青进行测试,试验温度为 -12℃和 -18℃,沥青试样尺寸为 101.6 mm×12.7 mm×6.4 mm。

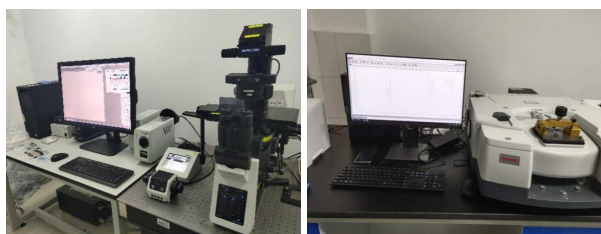
### 1.2.3 微观试验

(1) 荧光显微镜试验。采用日本奥林巴斯的荧光显微镜对原样 SBS 改性沥青、老化 SBS 改性沥青、

再生SBS改性沥青进行荧光显微镜试验,选用蓝色激发光源观察SBS在沥青样品中的分布,放大倍数为200倍。

(2) 傅里叶红外光谱(FTIR)试验。采用美国赛默飞公司所生产的IS50傅里叶红外光谱仪,分析原样SBS改性沥青、老化SBS改性沥青及再生SBS改性沥青的化学官能团,波数范围为 $4\,000\sim 400\text{ cm}^{-1}$ ,数据分辨率为 $0.09\text{ cm}^{-1}$ 。

微观实验室内的设备如图1所示。



(a) 荧光显微镜试验

(b) 红外光谱试验

图1 微观试验设备

Figure 1 Microtesting equipment

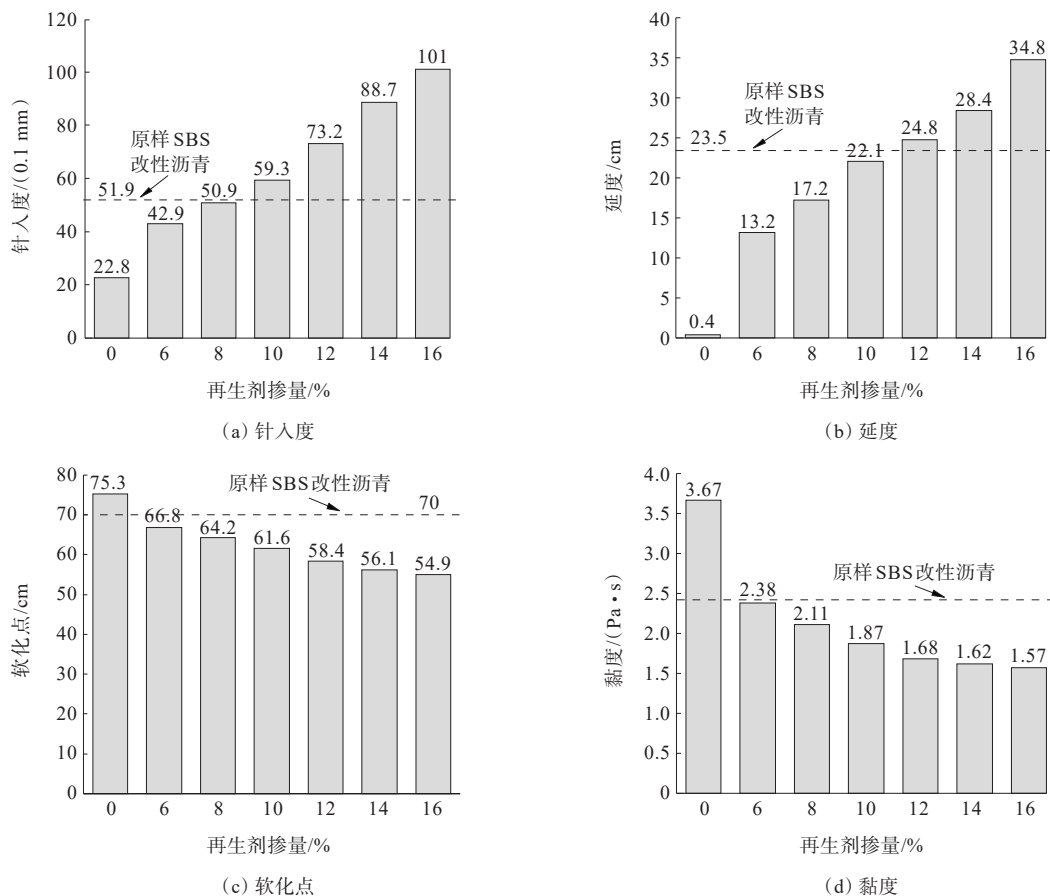


图2 原样SBS改性沥青、老化SBS改性沥青和再生SBS改性沥青的常规性能

Figure 2 Conventional properties of original SBS modified asphalt, aged SBS modified asphalt, and reclaimed SBS modified asphalt

## 2 试验结果与分析

### 2.1 常规性能

原样SBS改性沥青、老化SBS改性沥青(再生剂掺量为0)和再生SBS改性沥青的常规性能试验结果如图2所示。

由图2可知:

(1) 再生SBS改性沥青的针入度随着再生剂掺量的增加而增加。当再生剂掺量为8%时,再生SBS改性沥青的针入度接近原样SBS改性沥青;当再生剂掺量为10%时,其针入度为59.3(0.1 mm),接近《规范》中I-D级SBS改性沥青要求的上限值。

(2) 随着再生剂掺量的增加,再生SBS改性沥青的延度逐渐增大。当再生剂掺量为10%时,再生SBS改性沥青的延度接近原样SBS改性沥青;当再生剂掺量增加到12%时,此时再生SBS改性沥青的延度为24.8 cm,超过了原样SBS改性沥青延度。

(3) 随着再生剂掺量的增加,再生SBS改性沥青



的软化点逐渐减小。当再生剂掺量达到 10% 时,再生 SBS 改性沥青的软化点降至 61.6 °C,接近《规范》中 I-D 级 SBS 改性沥青要求的下限值。

(4) 随着再生剂掺量的增加,再生 SBS 改性沥青的 135 °C 黏度逐渐下降。当掺量为 6% 时,再生 SBS 改性沥青的 135 °C 黏度降至原样 SBS 改性沥青的 135 °C 黏度之下。

上述分析表明:反应型再生剂能够将老化 SBS 改性沥青的针入度、延度、软化点和 135 °C 黏度恢复至原样 SBS 改性沥青的水平。以全面恢复老化 SBS 改性沥青的各项常规性能为目标,可以确定再生 SBS 改性沥青的最佳再生剂掺量为 10%。在最佳再生剂掺量下,再生 SBS 改性沥青的 25 °C 针入度为 59.3(0.1 mm)、5 °C 延度为 22.1 cm、软化点为 61.6 °C、135.0 °C 黏度为 1.87 Pa·s,符合《规范》中 I-D 级 SBS 改性沥青的技术要求。

## 2.2 流变性能

### 2.2.1 动态剪切流变(DSR)试验

原样 SBS 改性沥青、老化 SBS 改性沥青和再生 SBS 改性沥青的 DSR 温度扫描试验结果如图 3 所示。

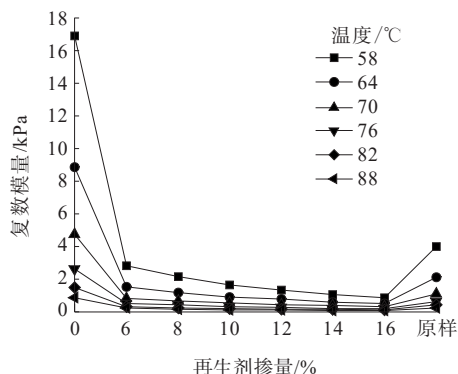
由图 3 可知:

(1) 原样 SBS 改性沥青、老化 SBS 改性沥青和再生 SBS 改性沥青的复数模量均随温度的升高而降低,但降低的幅度越来越小。在相同温度下,再生 SBS 改性沥青的复数模量均随再生剂掺量的增加而逐渐减小;但是随着温度的升高,再生沥青的复数模量随再生剂掺量的增加而降低,但降低的幅度越来越小。在相同温度下,当再生剂掺量约为 5.5% 时,再生 SBS 改性沥青的复数模量与原样 SBS 改性沥青的复数模量相近,说明再生 SBS 改性沥青的高温抗变形能力接近于原样 SBS 改性沥青。

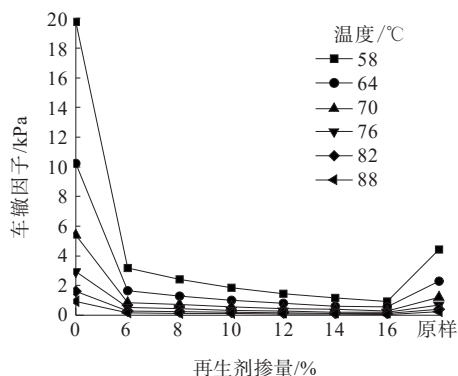
(2) 再生 SBS 改性沥青的车辙因子随再生剂掺量的变化规律与复数模量的变化基本相同。在相同温度下,当再生剂掺量约为 5.5% 时,再生 SBS 改性沥青的抗车辙因子与原样 SBS 改性沥青相近,说明此时再生 SBS 改性沥青的高温抗车辙能力接近于原样 SBS 改性沥青。

上述分析表明:掺入反应型再生剂后,老化 SBS 改性沥青的高温抗变形能力和抗车辙能力均明显下降,并且均下降到原样沥青的水平。当再生剂掺量

约为 5.5% 时,老化 SBS 改性沥青的高温抗变形能力和抗车辙能力均恢复至原样 SBS 改性沥青的水平。



(a) 复数模量



(b) 车辙因子

图 3 不同再生剂掺量下再生改性 SBS 沥青复数模量和车辙因子变化曲线

Figure 3 Variation of complex modulus and rutting factor of reclaimed modified SBS asphalt with different regenerative contents

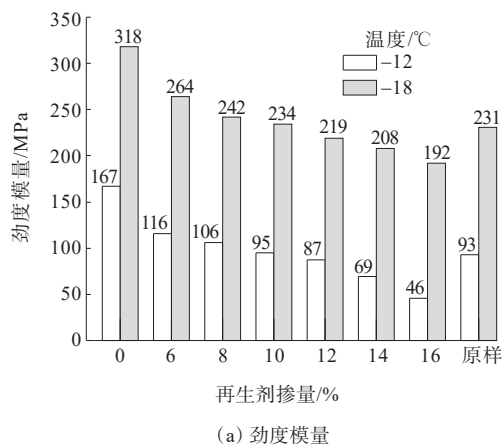
### 2.2.2 低温弯曲流变(BBR)试验

原样 SBS 改性沥青、老化 SBS 改性沥青和再生 SBS 改性沥青的 BBR 试验结果如图 4 所示。

由图 4 可知:原样 SBS 改性沥青经过长期老化后,蠕变劲度明显增大,蠕变速率明显减小,即沥青变硬变脆,低温抗裂性能下降。在相同温度下,随着再生剂掺量的增加,再生 SBS 改性沥青的劲度模量逐渐降低,而蠕变速率逐渐增大,表明再生剂提高了老化 SBS 改性沥青的低温变形能力和应力松弛能力。无论是在 -12 °C 下,还是在 -18 °C,当再生剂掺量为 10% 时,再生 SBS 改性沥青的蠕变劲度和蠕变速率均分别接近原样 SBS 改性沥青的劲度模量和蠕变速率。

上述分析表明:掺入反应型再生剂后,老化 SBS 改性沥青的低温变形能力和应力松弛能力均得到了

明显提升,并且均能恢复到原样SBS改性沥青的水平。当再生剂掺量为10%时,老化SBS改性沥青的蠕变劲度和蠕变速率均恢复至原样SBS改性沥青的水平。



## 2.3 微观试验分析

### 2.3.1 荧光显微镜试验

原样SBS改性沥青、老化SBS改性沥青和再生SBS改性沥青的荧光显微镜试验结果如图5所示。

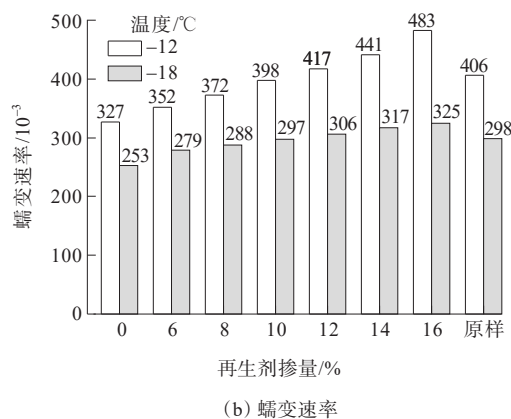


图4 不同再生剂掺量下再生改性SBS沥青劲度模量和蠕变速率曲线

Figure 4 Curves of stiffness modulus and creep rate of reclaimed modified SBS asphalt with different regenerant contents

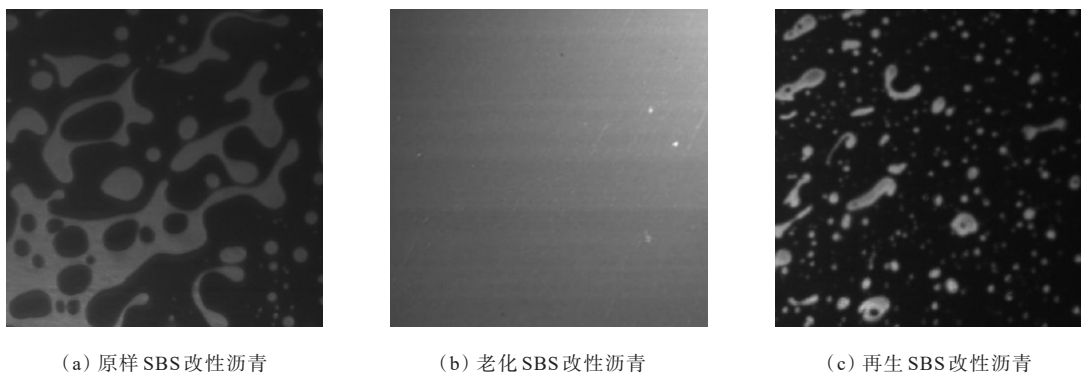


图5 原样SBS改性沥青、老化SBS改性沥青和再生SBS改性沥青的荧光显微镜试验结果

Figure 5 Fluorescence microscope test results of original SBS modified asphalt, aged SBS modified asphalt, and reclaimed SBS modified asphalt

从图5可以看出:原样SBS改性沥青中的SBS相分布均匀,分布密度大,SBS呈连续相,形成了良好的交联网络结构。老化SBS改性沥青中SBS交联网状结构消失,仅有几个细小的白色光点,表明SBS改性沥青老化后SBS改性剂发生了严重的断链、裂解。老化SBS改性沥青经再生后,SBS颗粒明显增多且分布较均匀。但与原样SBS改性沥青相比,SBS相面积更小,SBS交联网状结构并未完全恢复。这是因为反应型再生剂中含有少量的SBS改性剂,补充了老化沥青中降解的SBS改性剂,且再生剂中所能提供的轻质油等组分提升了老化沥青中轻质组分含量,使沥青与SBS有良好的相容性。另外,反应型再生剂中环氧材料的环氧基团与SBS降解所形成

的羧基发生化学反应,将老化断裂的SBS分子链接枝起来。

### 2.3.2 红外光谱试验

原样SBS改性沥青、老化SBS改性沥青和再生SBS改性沥青的红外光谱试验结果如图6所示。

从图6可知:与原样SBS改性沥青相比,老化SBS改性沥青966  $\text{cm}^{-1}$ 处的峰值变弱,表明老化使SBS结构中的丁二烯氧化、断裂,使SBS分子结构发生了破坏。与老化SBS改性沥青相比,再生SBS改性沥青727~868  $\text{cm}^{-1}$ 范围内吸收峰变强,此范围为芳香族分子吸收峰,表明反应型再生剂的添加补充了老化SBS改性沥青的芳香分含量,改善了老化SBS改性沥青的相容性,在一定程度上恢复了老化SBS

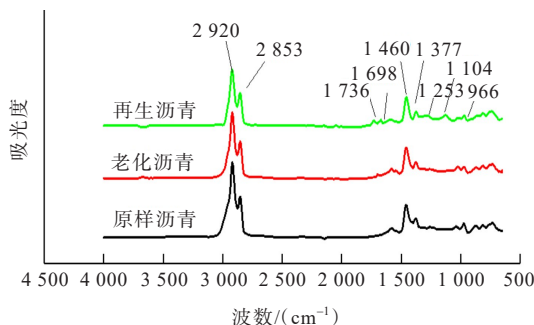


图6 原样SBS改性沥青、老化SBS改性沥青和再生SBS改性沥青的红外光谱试验结果

Figure 6 Infrared spectrum test results of original SBS modified asphalt, aged SBS modified asphalt, and reclaimed SBS modified asphalt

改性沥青的路用性能。再生SBS改性沥青在 $1104\text{ cm}^{-1}$ 、 $1253\text{ cm}^{-1}$ 、 $1736\text{ cm}^{-1}$ 处均出现了新的特征峰,其中 $1104\text{ cm}^{-1}$ 和 $1253\text{ cm}^{-1}$ 特征峰是由环氧材料中C—O对称伸缩振动和不对称伸缩振动产生的; $1736\text{ cm}^{-1}$ 特征峰为酯基—COO—伸缩振动引起的。同时位于 $1698\text{ cm}^{-1}$ 处羰基C=O的吸收峰强度减弱,表明反应型再生剂中环氧材料的环氧基团与老化SBS改性沥青中SBS降解氧化形成的羰基在高温下发生了聚合反应,生成了酯类化合物,将原已断裂的SBS分子链连接起来,使SBS网络结构得到一定程度的修复。与老化SBS改性沥青相比,再生SBS改性沥青在 $966\text{ cm}^{-1}$ 处SBS的特征峰吸收强度增强,这是由于添加的反应型再生剂中含有少量SBS改性剂导致。

### 3 结论

(1) 掺入反应型再生剂后,老化SBS改性沥青的各项常规性能都得到恢复。随着再生剂掺量的增加,各项常规性能的恢复程度也逐渐增强。当再生剂掺量达到10%时,其再生效果达到最佳。在最佳再生剂掺量下,再生SBS改性沥青的各项性能指标符合《规范》中I-D级SBS改性沥青的技术要求。

(2) 随着反应型再生剂掺量的增加,再生SBS改性沥青的复数模量和车辙因子均逐渐减小,表明再生SBS改性沥青在高温下的抗变形能力和抗车辙能力逐渐降低。当再生剂掺量约为5.5%时,再生SBS改性沥青的抗变形能力和抗车辙能力均恢复至原样SBS改性沥青的水平。

(3) 随着反应型再生剂掺量的增加,再生SBS改

性沥青的蠕变劲度逐渐减小,蠕变速率逐渐变大,表明再生SBS改性沥青在低温下的变形能力和应力松弛能力逐渐提高。当再生剂掺量为10%时,再生SBS改性沥青的蠕变劲度和蠕变速率均接近原样SBS改性沥青。

(4) 与老化SBS改性沥青相比,再生SBS改性沥青中SBS颗粒明显增多且分布较均匀,其原有的交联网状结构能够得到一定程度的恢复。这主要是因为反应型再生剂中的环氧材料的环氧基团与老化SBS改性沥青中的羰基发生了化学反应,生成了酯类化合物,从而成功地将断裂的SBS分子链重新连接起来。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 叶向前,邹晓翎,田发富.紫外老化对SBS-MCR复合改性沥青流变性能影响规律研究[J].中外公路,2022,42(6): 236-240.  
YE Xiangqian, ZOU Xiaoling, TIAN Fafu. Study on influence of ultraviolet radiation aging on rheological properties of SBS-MCR modified asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(6): 236-240.
- [2] 冉龙飞,何兆益,曹青霞.SBS改性沥青再生剂性能研究[J].建筑材料学报,2015,18(4): 578-583,595.  
RAN Longfei, HE Zhaoyi, CAO Qingxia. Performance research of regenerative agent based on SBS-modified asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(4): 578-583, 595.
- [3] 甘新立,郑南翔,纪小平.老化SBS改性沥青再生性能预估分析[J].江苏大学学报(自然科学版),2014,35(6): 715-718.  
GAN Xinli, ZHENG Nanxiang, JI Xiaoping. Prediction analysis of recycled performance for aged SBS modified asphalt[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2014, 35(6): 715-718.
- [4] 黄晓.SBS改性沥青在不同老化状态下的多次再生评价[J].新型建筑材料,2018,45(6): 99-103.  
HUANG Xiao. Evaluation on multiple regenerations of SBS modified asphalt under different aging conditions[J]. New Building Materials, 2018, 45(6): 99-103.
- [5] 周艺,李泉,童瑶,等.再生剂对SBS改性沥青宏观性能与微观结构的影响[J].公路,2022,67(6): 302-309.  
ZHOU Yi, LI Quan, TONG Yao, et al. The effect of

- regenerator on the macro performance and microstructure of SBS modified asphalt[J]. Highway, 2022, 67(6): 302-309.
- [6] 陈静云,邱隆亮. SBS改性沥青老化与再生机理的红外光谱[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(5): 859-864.
- CHEN Jingyun, QIU Longliang. Analysis of the mechanism of aging and regeneration of SBS modified asphalt based on the infrared spectrum[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2012, 28(5): 859-864.
- [7] 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.
- [8] 谢远光,殷鹏. 基于新型再生剂的SBS改性沥青的流变特性及微观机制[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(6): 95-100.
- XIE Yuanguang, YIN Peng. Rheological characteristics and micro mechanism of SBS modified asphalt based on new regenerative agent[J]. New Building Materials, 2021, 48(6): 95-100.
- [9] 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 of aged SBS modified asphalt and its mechanism analysis[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2017, 37(3): 1-8.
- [10] SUN L, WANG Y Y, ZHANG Y M. Aging mechanism and effective recycling ratio of SBS modified asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2014, 70: 26-35.
- [11] LIU G, LEEGWATER G, NIELSEN E, et al. Evaluating the rheological properties of PMB-containing RA binders from surface-layer asphalt mixtures to be recycled[J]. Construction and Building Materials, 2013, 49: 8-14.
- [12] WEI C W, ZHANG H L, DUAN H H. Effect of catalytic-reactive rejuvenator on structure and properties of aged SBS modified asphalt binders[J]. Construction and Building Materials, 2020, 246: 118531.
- [13] WANG Q M, YE Q S, LUO J H, et al. Effects of tung oil composite regenerating agent on rheological properties and microstructures of reclaimed asphalt binder[J]. Materials, 2022, 15(9): 3197.
- [14] 崔亚楠,崔树宇,郭立典. 废机油再生SBS改性沥青的性能及机理[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(2): 164-170.
- CUI Yanan, CUI Shuyu, GUO Lidian. Performance and mechanism of waste oil recycled SBS modified asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(2): 164-170.
- [15] 畅润田,王威,樊长昕,等. 一种植物油基再生剂对老化沥青性能的影响[J]. 中外公路, 2022, 42(3): 186-190.
- CHANG Runtian, WANG Wei, FAN Changxin, et al. Effect of a vegetable oil-based regenerant on performance of aged asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3): 186-190.
- [16] CAI X, ZHANG J Y, XU G, et al. Internal aging indexes to characterize the aging behavior of two bio-rejuvenated asphalts[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 220: 1231-1238.
- [17] 张庆宇,康佳旺,赵毅. 高掺量胶粉/SBS复合改性沥青混合料永久变形预估模型[J]. 中外公路, 2022, 42(6): 197-202.
- ZHANG Qingyu, KANG Jiawang, ZHAO Yi. Prediction model of permanent deformation of high content crumb rubber/SBS composite modified asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(6): 197-202.
- [18] YU X K, ZAUMANIS M, DOS SANTOS S, et al. Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders[J]. Fuel, 2014, 135: 162-171.
- [19] 刘朝晖,黄优,余时清,等. 刚柔复合式路面结构与材料及发展趋势[J]. 中外公路, 2024, 44(2): 27-53.
- LIU Zhaohui, HUANG You, YU Shiqing, et al. Structure and material of rigid-flexible composite pavements and development[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(2): 27-53.
- [20] 姚晓光,王燕,许涛,等. SBS改性沥青老化模拟及再生研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(12): 1070-1078.
- YAO Xiaoguang, WANG Yan, XU Tao, et al. Research on aging simulation and recycling of SBS modified asphalt[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019, 52(12): 1070-1078.