

文章编号:1007-9629(2022)03-0320-07

# 基于 DSR 试验的生物重油再生沥青流变性能评价

范世平<sup>1</sup>, 朱洪洲<sup>1,2,\*</sup>, 钟伟明<sup>3</sup>

(1.重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 2.重庆交通大学 交通土建工程材料国家地方联合实验室, 重庆 400074; 3.湖南省交通科学研究院有限公司, 湖南 长沙 410015)

**摘要:**为研究生物重油再生沥青的流变性能,将生物重油掺入经旋转薄膜烘箱试验(RTFOT)老化的 70<sup>#</sup>沥青和 SBS 改性沥青中制备生物重油再生沥青,通过动态剪切流变(DSR)试验研究了沥青的流变性能.结果表明:生物重油的掺入提高了老化沥青的抗疲劳性能、低温抗裂能力和黏性比例,降低了高温抗车辙性能;低频加载易使沥青产生不可恢复的永久性变形;生物重油对 70<sup>#</sup>老化沥青的再生效果优于老化 SBS 改性沥青;建议生物重油掺量宜为 4%,该掺量下再生沥青的性能可恢复至原样沥青.

**关键词:**生物重油再生沥青;流变性能;RTFOT 试验;DSR 试验;疲劳性能;高温稳定性

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.03.015

## Rheological Property Evaluation of Heavy Bio-oil Recycled Asphalt Based on DSR Test

FAN Shiping<sup>1</sup>, ZHU Hongzhou<sup>1,2,\*</sup>, ZHONG Weiming<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. National Local Joint Laboratory of Materials for Transportation Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Hunan Communications Research Institute Co., Ltd., Changsha 410015, China)

**Abstract:** To study the rheological properties of heavy bio-oil recycled asphalt, the heavy bio-oil was mixed into 70<sup>#</sup> asphalt and SBS modified asphalt aged by rotary film oven test (RTFOT) to prepare heavy bio-oil recycled asphalt, and the rheological properties were investigated via dynamic shear rheology (DSR) test. The results show that the fatigue resistance, low-temperature crack resistance and viscosity ratio of aged asphalt are improved and the high-temperature rutting resistance is reduced after mixing with heavy bio-oil. The asphalt is subject to irrecoverable permanent deformation at low frequency loading. The improvement effect of heavy bio-oil on 70<sup>#</sup> aged asphalt is better than that of SBS modified asphalt. In addition, it is suggested that the suitable content of heavy bio-oil is 4%, because the properties of recycled asphalt are restored to the original asphalt at this content.

**Key words:** heavy bio-oil recycled asphalt; rheological property; RTFOT test; DSR test; fatigue property; high temperature stability

对废旧沥青混合料的合理处置既节约成本又保护环境,符合绿色交通发展理念,国内外学者对此展开了大量研究,并取得显著成效<sup>[1-6]</sup>.研究发现,将废

旧沥青混合料循环再生后,可用于道路基础设施建设与养护,另外废旧沥青混合料还可以进行多次再生<sup>[7]</sup>.沥青的路用性能因老化而显著降低,可使用再

收稿日期:2020-11-18; 修订日期:2021-01-18

基金项目:高寒高海拔地区道路工程安全与健康国家重点实验室开放基金资助项目(YGY 2017 KYPT-02);重庆交通大学研究生科研创新项目(CYB21211).

第一作者:范世平(1993—),男,贵州遵义人,重庆交通大学博士生. E-mail: fsp\_china@163.com.

通讯作者:朱洪洲(1976—),男,山东莱州人,重庆交通大学教授,博士生导师,博士. E-mail: zhu hongzhou china@cqjtu.edu.cn

生剂对老化沥青路用性能加以恢复<sup>[8]</sup>。

生物重油是柴油生产过程中的主要工业废弃物,除少量被用于黏结剂、防水卷材及重质燃料外,大多被堆放在户外,给土壤和空气带来严重污染<sup>[9]</sup>。生物重油主要含碳氢化合物及其衍生物,含有大量的不饱和脂肪酸,类似于沥青中的轻质油分,可用于补充沥青因老化失去的轻质油分<sup>[10]</sup>。Asli等<sup>[11]</sup>和Zargar等<sup>[12]</sup>研究表明生物重油可作为抗氧化剂用于再生老化沥青。虽然生物重油可以改善老化沥青的路用性能,但生物重油掺量不宜过多,否则将降低混合料的抗热解能力<sup>[13-14]</sup>。生物重油用于再生老化沥青具有重要的经济和环境效益。

通过动态剪切流变(DSR)试验可以在特定应力或应变荷载重复作用下得到沥青黏弹性参数(如复数剪

切模量和相位角)随加载次数的变化规律,能有效表征沥青流变性能<sup>[15-18]</sup>。基于DSR试验,本研究分析了生物重油对旋转薄膜烘箱(RTFOT)老化后的70<sup>#</sup>沥青和SBS改性沥青的再生效果,以及再生沥青的流变性能,以期生物重油再生沥青的应用提供必要的理论依据。

## 1 原材料与方法

### 1.1 沥青

原样沥青采用常用的AH-70<sup>#</sup>沥青和壳牌SBS改性沥青(分别记为70<sup>#</sup>-O和SBS-O),根据JTGE20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,测试原样沥青的基本性能,结果如表1所示。表1表明2种原样沥青的基本性能均满足JTGF40—2004《公路沥青路面施工技术规范》要求。

表1 沥青基本性能  
Table 1 Basic properties of asphalts

Item	Test value		Specification		Method
	SBS-O	70 <sup>#</sup> -O	SBS modified asphalt	70 <sup>#</sup> matrix asphalt	
Penetration (100 g, 5 s, 25 °C)/(0.1 mm)	44	73	40-60	60-80	T0604
Softening point/°C	71.8	49.8	≥60	≥43	T0605
Ductility/cm	41.2(5 °C)	24.1(10 °C)	≥20(5 °C)	≥15(10 °C)	T0606
Viscosity (135 °C)/(Pa·s)	1.040	0.356	<3	<3	T0625
Quality change/%	-0.1	-0.1	≤±1.0	≤±0.8	T0609
After RTFOT Residual penetration ratio/%	69	65	≥65	≥58	T0604
Residual ductility/cm	16.2(5 °C)	6.0(10 °C)	≥15	≥4	T0605

### 1.2 生物重油

生物重油为生产柴油时的副产物,其物理性能和化学组成(质量分数,文中涉及的组成、掺量等除特别注

明外均为质量分数和质量比)如表2所示。生物重油中的C、H、O含量占总元素含量的98%以上, $m(C)/m(H)$ 为0.6,主要含芳香族碳氢化合物及其O、S、N衍生物。

表2 生物重油的理化性能  
Table 2 Physical and chemical property of heavy bio-oil<sup>[10]</sup>

Color/Appearance	Physical property			Chemical composition (by mass)/%				
	Water content (by mass)/%	Viscosity (30 °C) / (mPa·s)	Relative density (with water)	C	H	N	S	O
Brown black/ Viscous liquid	2.8	74.2	0.939	75.10	10.50	1.10	0.04	13.30

### 1.3 沥青老化

美国SHRP计划规定采用旋转薄膜烘箱(RTFOT)试验和压力老化(PAV)试验模拟沥青的短期老化和长期老化。将RTFOT老化时间延长到255 min,可近似等效为PAV老化<sup>[19]</sup>。本研究选用延时RTFOT方法制备老化沥青,RTFOT方法参照JTGE20—2011进行,老化时间取为255 min,老化后的沥青分别记为70<sup>#</sup>-A和SBS-A。

### 1.4 生物重油再生沥青的制备

参照文献<sup>[10-12]</sup>,将生物重油掺量( $w\%$ )取为2%、4%、6%和8%,剪切温度设为135 °C,采用高速剪切乳化机制备生物重油再生沥青。生物重油掺量不同的再生沥青分别记为70<sup>#</sup>-A+ $w\%$ 和SBS-A+ $w\%$ ,其制备工艺如图1所示。

### 1.5 基本性能试验

根据JTGE20—2011对老化沥青和再生沥青进

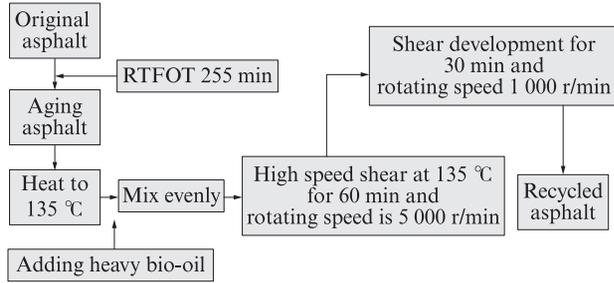


图1 生物重油再生沥青制备工艺

Fig. 1 Preparation process of heavy bio-oil recycled asphalt

行三大指标试验,采用式(1)计算各指标的变化率,分析生物重油对老化沥青三大指标的改善效果.

$$IR = \frac{I - I_0}{I_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:IR为再生沥青的指标变化率; $I_0$ 为老化沥青的指标值; $I$ 为再生沥青与 $I_0$ 相对应的指标值.

1.6 DSR 试验

本研究对原样沥青、老化沥青和再生沥青分别进行DSR温度、时间和频率扫描试验,分析沥青的高温稳定性、疲劳性能和黏弹性. DSR试验参数如表3所示.

采用复数剪切模量( $G^*$ )和相位角( $\delta$ )表征沥青抗变形能力和黏弹性,如图2所示. $G^*$ 包括储存模量( $G'$ )和损耗模量( $G''$ )两部分, $G^*$ 越大,抗剪切变形能力越强. $\delta$ 为评价沥青结合料黏性(不可恢复部分)和

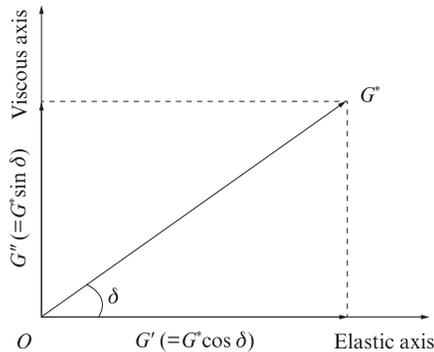


图2 复数模量与相位角关系

Fig. 2 Relationship between complex modulus and phase angle

弹性(可恢复部分)成分的比例指标, $\delta$ 越大,沥青的黏性成分越大,越易发生不可恢复的永久变形; $\delta$ 越小,沥青弹性可恢复成分越多. $G^*/\sin \delta$ 表示车辙因子, $G^*/\sin \delta$ 越大,沥青高温性能越好.在SHRP沥青路用性能中,用疲劳因子( $G^* \cdot \sin \delta$ )来评价沥青的抗疲劳性能, $G^* \cdot \sin \delta$ 越小,沥青抗疲劳性能越好.

2 试验结果与讨论

2.1 基本性能试验

原样沥青、老化沥青和再生沥青三大指标试验结果及其变化率如图3所示.由图3可见,未掺生物重油的老化沥青70<sup>#</sup>-A和SBS-A的针入度为33、27(0.1 mm),软化点为57.6、81.8 °C,延度为9.5、18.6 cm.针入度和延度均不满足原样沥青限值要求(表1),这是由于老化使沥青轻组分挥发,沥青质含量增多,沥青变硬,从而导致其针入度和延度降低,而软化点升高.

由图3还可见:(1)掺入4%生物重油后,再生沥青70<sup>#</sup>-A+4%和SBS-A+4%的三大指标值已接近原样沥青,这是因为生物重油可以补充沥青因老化而挥发的轻质组分并使沥青软化,从而提高沥青的针入度和延度,降低软化点;当生物重油掺量为6%时,再生沥青针入度较大,已超过原样沥青上限值要求,可能导致沥青极软,严重影响沥青高温性能,因此建议生物重油掺量不宜超过4%.(2)生物重油掺量相同时,70<sup>#</sup>再生沥青的基本性能变化率大于再生SBS改性沥青,说明生物重油对70<sup>#</sup>-A沥青性能的再生效果优于SBS-A沥青,且生物重油掺量越大,2种再生沥青性能变化率差异越显著,如70<sup>#</sup>-A+6%和SBS-A+6%再生沥青针入度变化率分别为191%和93%,70<sup>#</sup>-A+8%和SBS-A+8%再生沥青针入度变化率273%和141%.这可能是由于SBS改性沥青的老化除了沥青成分的老化外,还有SBS改性剂的老化,生物重油可补充沥青因老化挥发的轻质油分,但并不能改善因老化失效的SBS改性剂,因此对SBS-A的改善效果低于70<sup>#</sup>-A.

表3 DSR 试验参数

Table 3 Parameters of DSR test [15-18]

Indicator	Temperature sweep	Time sweep	Frequency sweep
Temperature/°C	46-82	25	60
Diameter of parallel plate/mm	25	8	25
Spacing of parallel plate/mm	1	2	1
Frequency/(rad·s <sup>-1</sup> )	10	10	0.1-100
Strain/%	5(70 <sup>#</sup> ),8(SBS)	5(70 <sup>#</sup> ),8(SBS)	5(70 <sup>#</sup> ),8(SBS)
Temperature step/°C	6		

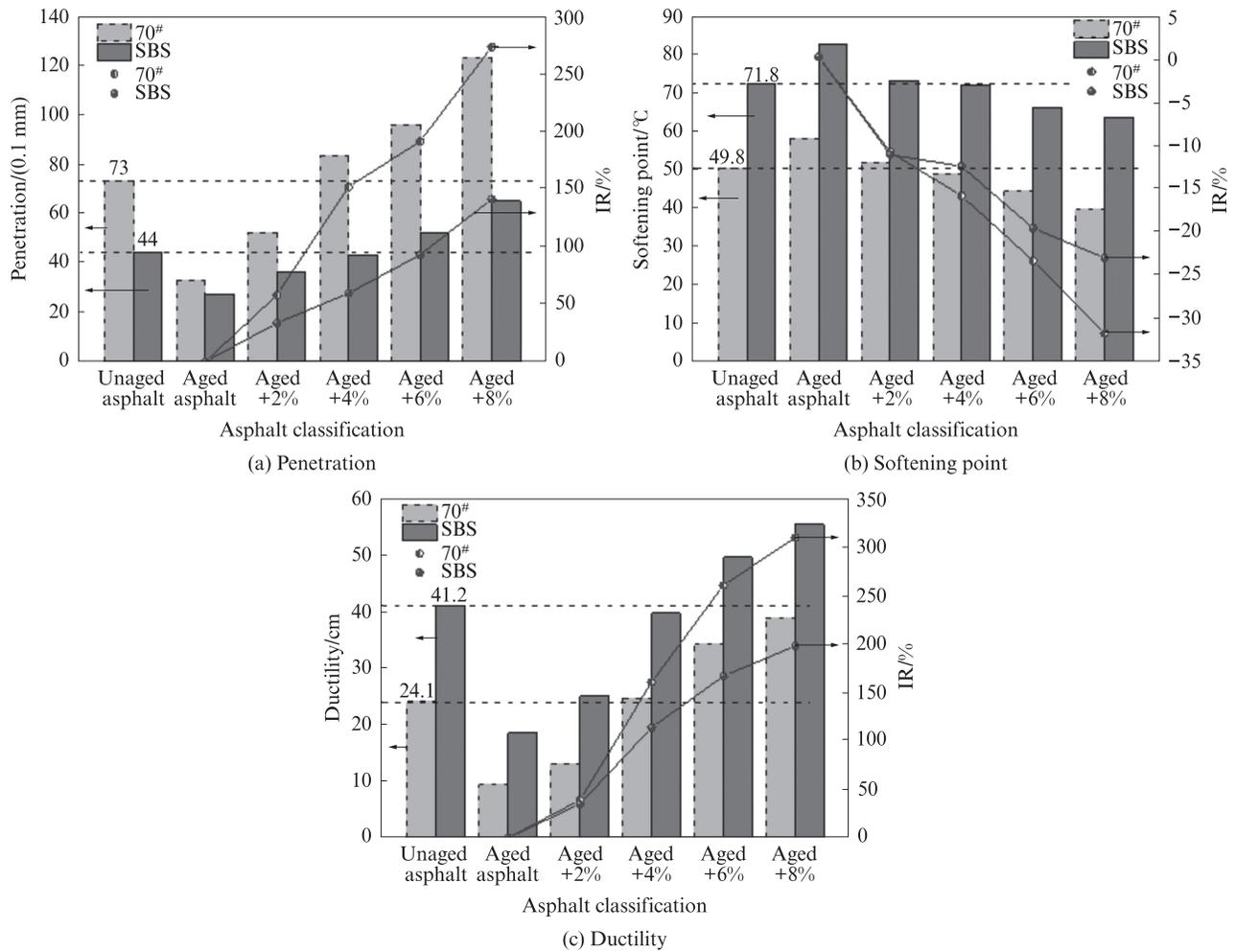


图3 沥青基本性能试验结果  
Fig. 3 Basic properties test results of asphalt

2.2 DSR 温度扫描

根据DSR温度扫描试验结果,得到原样沥青、老化沥青和再生沥青的  $G^*$  和  $G^*/\sin \delta$  与温度( $T$ )的关系曲线,如图4、5所示.由图4、5可知:各沥青的  $G^*$  和  $G^*/\sin \delta$  均随温度的升高而下降,即升高温度对沥青抗剪切变形能力和抗车辙能力不利;与原样沥青相比,沥青老化后,  $G^*$  和  $G^*/\sin \delta$  有所增加,在一定程度上提升了沥青抗剪切变形能力和抗车辙能力;再生沥青的  $G^*$  和  $G^*/\sin \delta$  随着生物重油掺量的增加而降低,当生物重油掺量为4%时,再生沥青的  $G^*$  和  $G^*/\sin \delta$  接近原样沥青;当生物重油掺量为6%和8%时,再生沥青的  $G^*$  和  $G^*/\sin \delta$  已显著低于原样沥青,对沥青高温稳定性不利.

图6为原样沥青、老化沥青和再生沥青的  $\delta$  与  $T$  的关系曲线.由图6可见:各沥青的  $\delta$  随着温度的升高而增加,这是由于沥青在高温下逐渐软化,弹性成分降低,黏性成分增大;当沥青老化后,沥青变硬,弹性恢复能力增强,  $\delta$  降低;生物重油会显著改善老化沥青黏弹性比例,随着生物重油掺量的增加,再生沥青的  $\delta$

增加;当温度小于60℃时,生物重油掺量为2%~8%的70#再生沥青的  $\delta$  均小于70#-O沥青;当温度超过60℃时,掺量为4%~8%的70#再生沥青的  $\delta$  超过70#-O沥青,说明该掺量和试验温度下再生沥青黏性成分较高,而在实际情况中,中国某些地区在夏季高温时沥青路面温度可能达到65℃,因此高掺量的生物重油再生沥青在荷载作用下易产生车辙病害.当生物重油掺量为4%时,再生沥青SBS-A+4%的  $\delta$  基本恢复至SBS-O沥青,这与  $G^*$  和  $G^*/\sin \delta$  试验结果相同,且当生物重油掺量为6%和8%时,再生沥青的  $\delta$  超过原样沥青,因此建议生物重油掺量不宜超过4%.

2.3 DSR 时间扫描

原样沥青、老化沥青和再生沥青的  $G^* \cdot \sin \delta$  与加载次数( $N$ )的关系曲线如图7所示.由图7可知:随着  $N$  的增加,各沥青的  $G^* \cdot \sin \delta$  呈现先缓慢下降随后快速下降的趋势,即剪切过程中能量损失逐渐增大;70#-A沥青和SBS-A沥青的  $G^* \cdot \sin \delta$  有显著提升,这是由于沥青老化后,沥青变硬变脆,在重复加载过程

中,加载周期内能量损失增大,沥青疲劳性能降低;再生沥青的  $G^* \cdot \sin \delta$  随着生物重油掺量的增加而降低,说明生物重油可以提高老化沥青的疲劳性能,原

样沥青的  $G^* \cdot \sin \delta$  介于生物重油掺量为 2%~4% 的再生沥青之间,且再生沥青的  $G^* \cdot \sin \delta$  开始加速下降时的荷载作用次数明显高于原样沥青.

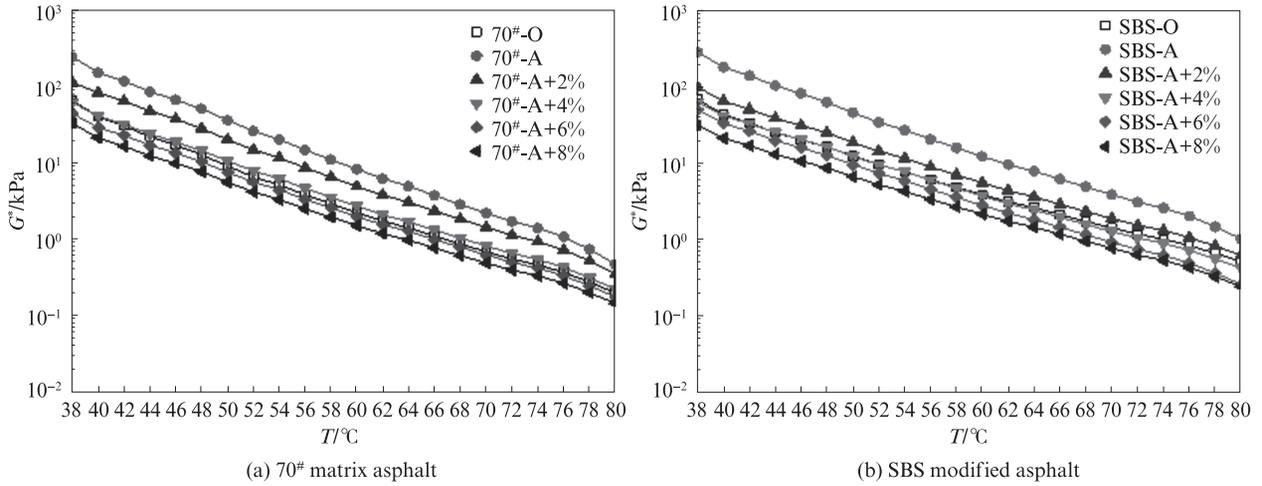


图4 不同沥青的  $G^*$  与  $T$  的关系曲线

Fig. 4 Relationship curves between  $G^*$  and  $T$  of different asphalts

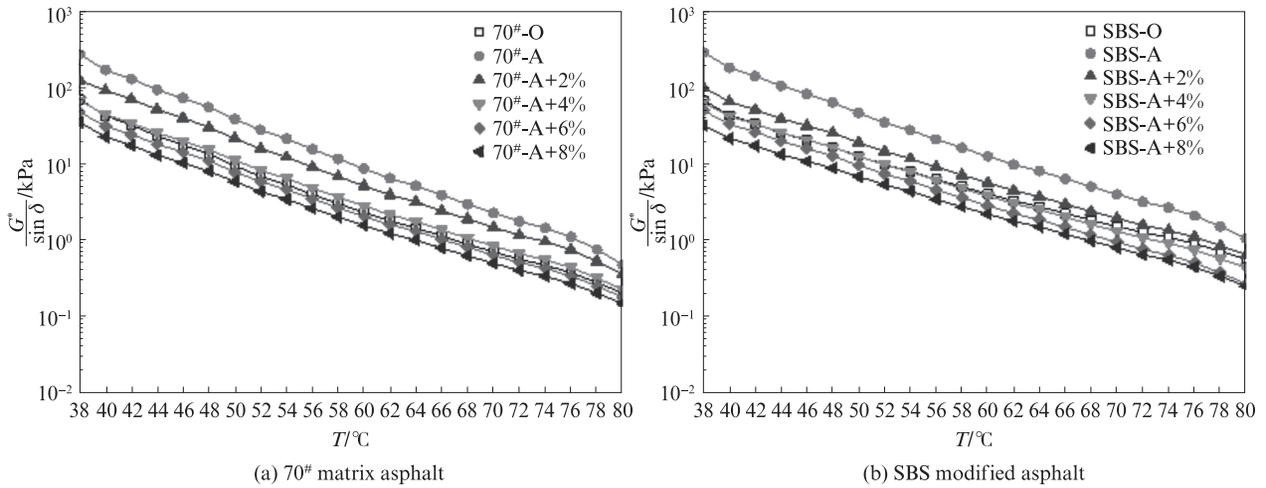


图5 不同沥青的  $G^*/\sin \delta$  与  $T$  的关系曲线

Fig. 5 Relationship curves between  $G^*/\sin \delta$  and  $T$  of different asphalts

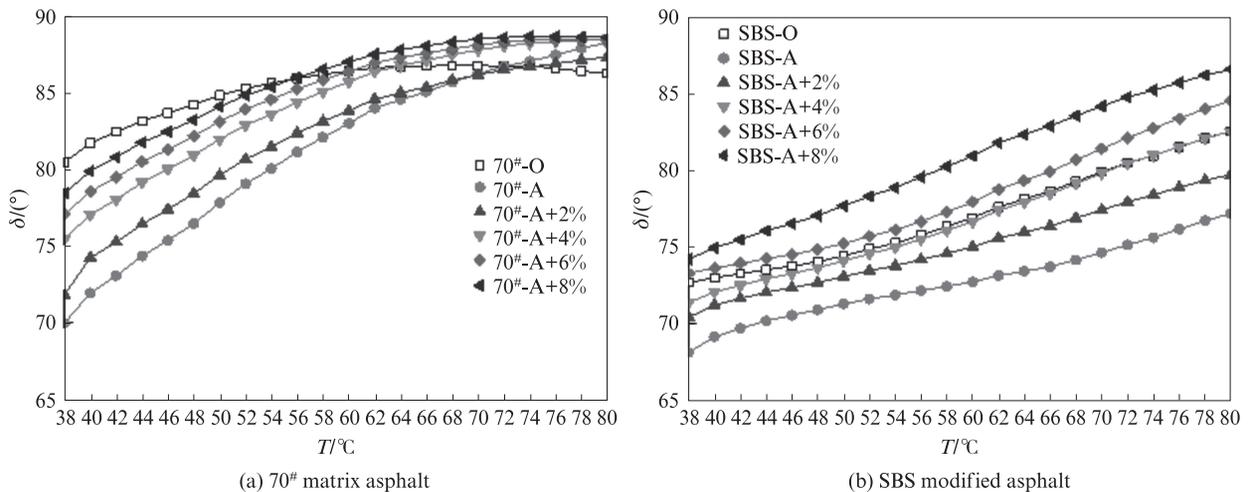


图6 不同沥青的  $\delta$  与  $T$  的关系曲线

Fig. 6 Relationship curves between  $\delta$  and  $T$  of different asphalts

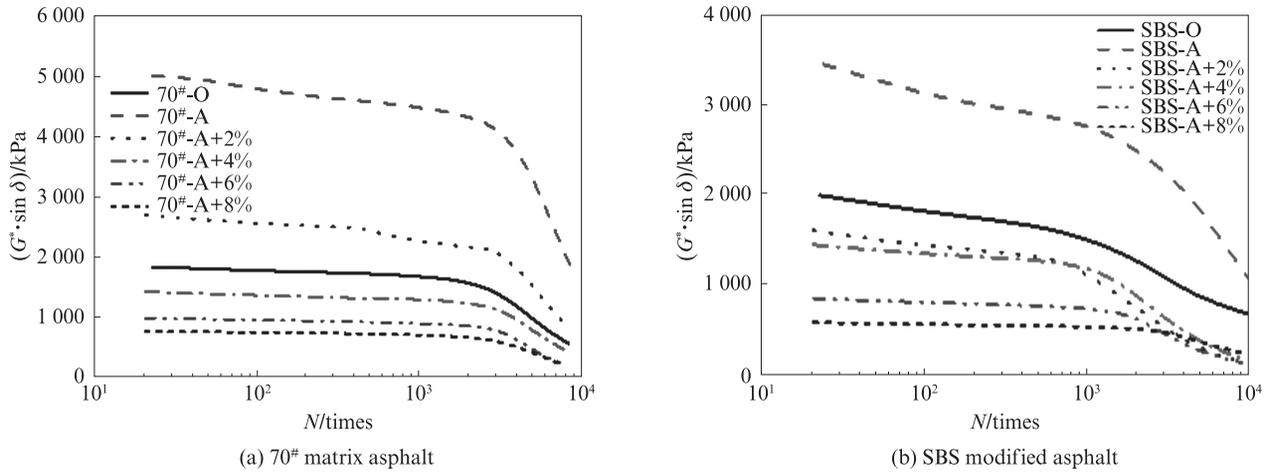


图7 不同沥青的  $G^* \cdot \sin \delta$  与  $N$  的关系曲线  
 Fig. 7 Relationship curves between  $G^* \cdot \sin \delta$  and  $N$  of different asphalts

2.4 DSR 频率扫描

考虑到目前中国道路规定车辆正常行驶的速度范围,本研究在 60 °C 和 0.1~100 rad/s 条件下,分析了不同沥青的黏弹特性.原样沥青、老化沥青和再生沥青在不同频率扫描后的  $\tan \delta$  与频率( $\omega$ )的变化关系如图 8 所示.由图 8 可知:除原样沥青 SBS-O 和再生沥青 SBS-A+6%、SBS-A+8% 外,其他各沥青在整个频率扫描范围内的  $\tan \delta$  值随着  $\omega$  的增加而降低;在相同条件下,70# 沥青的  $\tan \delta$  均大于 SBS 改性沥青,说明 SBS 改性沥青在荷载作用后的弹性恢复

能力优于 70# 沥青;70#-A 沥青和 SBS-A 沥青的  $\tan \delta$  值均小于原样沥青,这是因为老化使沥青变硬,弹性成分增加;再生沥青的  $\tan \delta$  随着生物重油掺量的增加而增大,是因为生物重油使沥青软化,提高了沥青的黏性,且当  $\omega$  较小时,沥青均表现出较高的黏性性能,反映了在重载低速交通荷载下沥青的黏性特征增加,易产生不可恢复变形并最终形成路面车辙病害.尤其当  $\omega$  小于 1 rad/s 时,再生沥青 SBS-A+6%、SBS-A+8% 的  $\tan \delta$  随着  $\omega$  增加而增大,沥青的黏性增强,因此建议生物重油掺量不宜超过 4%.

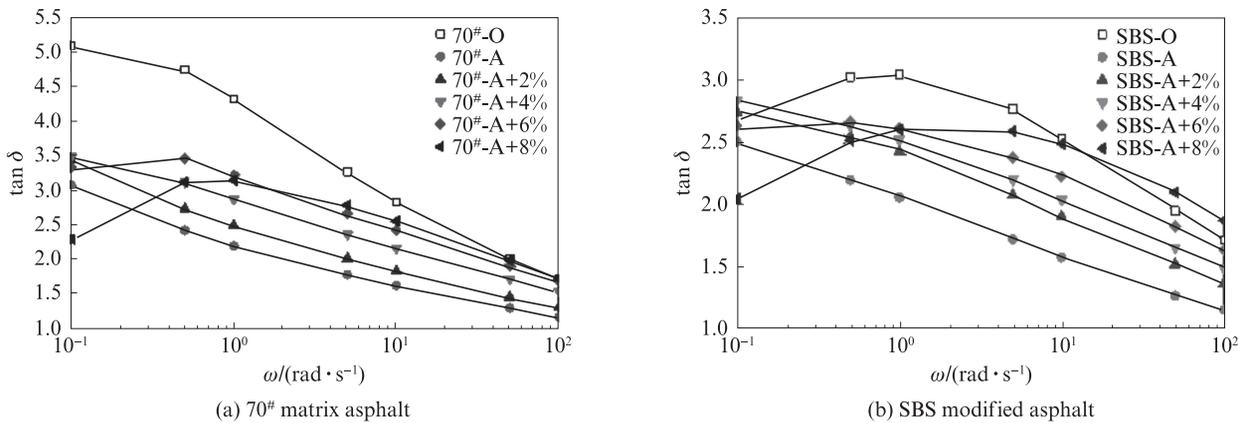


图8 不同沥青的  $\tan \delta$  与  $\omega$  的关系曲线  
 Fig. 8 Relationship curves between  $\tan \delta$  and  $\omega$  of different asphalts

3 结论

(1)生物重油可显著提高老化沥青的针入度、延度和抗疲劳性能,降低软化点和抗车辙能力.再生沥青的  $G^*$ 、 $G^*/\sin \delta$  和  $G^* \cdot \sin \delta$  随着生物重油掺量的增加而降低.当生物重油掺量为 4% 时,再生沥青的三大指标恢复至原样沥青;当生物重油掺量超过 4% 时,沥青的抗剪切变形能力和高温稳定性有所削弱.

建议生物重油掺量不宜超过 4%.

(2)随着生物重油掺量的增加,老化沥青中的黏性成分逐渐增大,接近原样沥青.生物重油对 70#-A 沥青的再生效果优于 SBS-A 沥青,但再生 SBS 改性沥青在荷载作用后的弹性恢复能力优于再生 70# 沥青.在重载低速交通荷载下再生沥青路面易产生不可恢复变形并最终形成路面车辙病害.

## 参考文献:

- [ 1 ] 郭鹏, 谢凤章, 孟建玮, 等. 沥青再生过程中新-旧沥青界面混溶行为综述[J]. 材料导报, 2020, 34(13):13100-13108.  
GUO Peng, XIE Fengzhang, MENG Jianwei, et al. Review on the interface blending behavior of virgin asphalt and aged asphalt during asphalt reclaiming [J]. Materials Reports, 2020, 34(13): 13100-13108. (in Chinese)
- [ 2 ] ZAUMANIS M, CAVALLI M C, POULIKAKOS L D. How not to design 100% recycled asphalt mixture using performance-based tests [J]. Road Materials and Pavement Design, 2019, 21(6):1-13.
- [ 3 ] 况栋梁, 刘文昌, 张阳, 等. 基于表面润湿理论的再生剂-老化沥青界面扩散行为评价[J]. 中国公路学报, 2020, 33(7):58-67.  
KUANG Dongliang, LIU Wenchang, ZHANG Yang, et al. Evaluation of interface diffusion behavior between rejuvenator and aged asphalt based on surface wettability theory [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(7):58-67. (in Chinese)
- [ 4 ] ORESKOVIC M, MENEGUSSO P R I E S G, BRESSI S, et al. Quantitative assessment of the parameters linked to the blending between reclaimed asphalt binder and recycling agent: A literature review [J]. Construction and Building Materials, 2020, 234: 117323.
- [ 5 ] LEE S H, TAM A B, KIM J, et al. Evaluation of rejuvenators based on the healing and mechanistic performance of recycled asphalt mixture [J]. Construction and Building Materials, 2019, 220:628-636.
- [ 6 ] ZHANG J, SUN H, JIANG H, et al. Experimental assessment of reclaimed bitumen and RAP asphalt mixtures incorporating a developed rejuvenator [J]. Construction and Building Materials, 2019, 215:660-669.
- [ 7 ] 王杰, 秦永春, 曾蔚, 等. 多次再生沥青混合料沥青组分迁移及其性能[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(1):77-84.  
WANG Jie, QING Yongchun, ZENG Wei, et al. Asphalt component migration and mixture properties investigation for repeated recycled asphalt mixture [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1):77-84. (in Chinese)
- [ 8 ] 朱洪洲, 范世平, 卢章天. 基于DSR时间扫描的沥青常应力疲劳演化规律分析[J]. 公路交通科技, 2017, 34(11):8-14, 37.  
ZHU Hongzhou, FAN Shiping, LU Zhangtian. Fatigue evolution analysis of asphalt under constant stress based on DSR time-sweep test [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(11):8-14, 37. (in Chinese)
- [ 9 ] 张佳运, 郭易木, 童天志, 等. 生物柴油残渣对老化沥青物理性能的影响[J]. 石油沥青, 2014, 28(4):11-15.  
ZHANG Jiayun, GUO Yimu, TONG Tianzhi, et al. Effect of biodiesel residue on physical properties of aging asphalt [J]. Petroleum Asphalt, 2014, 28(4):11-15. (in Chinese)
- [ 10 ] 朱洪洲, 钟伟明, 万逸秋, 等. 生物重油再生沥青物理性能试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(8):23-28.  
ZHU Hongzhou, ZHONG Weiming, WAN Yiqiu, et al. Experimental study on physical properties of heavy bio-oil recycled asphalt [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2018, 37(8):23-28. (in Chinese)
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] 唐伯明, 曹芯芯, 朱洪洲, 等. 生物油再生沥青胶结料路用性能分析[J]. 中国公路学报, 2019, 32(4):207-214.  
TANG Boming, CAO Xinxin, ZHU Hongzhou, et al. Pavement properties of bio-oil rejuvenated asphalt binder [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(4):207-214. (in Chinese)
- [ 14 ] 冷滨滨, 陈美祝, 吴少鹏. 废食用植物油再生沥青的物理性能研究[J]. 公路, 2014(2):175-179.  
LENG Binbin, CHEN Meizhu, WU Shaopeng. Research on physical properties of recycled asphalt with waste vegetable oil [J]. Highway, 2014(2):175-179. (in Chinese)
- [ 15 ] 孙大权, 林添坂, 曹林辉. 基于动态剪切流变试验的沥青疲劳寿命分析方法[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(2):346-350.  
SUN Daquan, LIN Tianban, CAO Linhui. Evaluation method for fatigue life of asphalt based on dynamic shear rheometer test [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(2):346-350. (in Chinese)
- [ 16 ] 陈浩浩, 吴少鹏, 刘全涛, 等. 沥青的疲劳性能评价方法研究[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(12):47-52.  
CHEN Haohao, WU Shaopeng, LIU Quantao, et al. Study on evaluation method for fatigue property of asphalt [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2015, 37(12):47-52. (in Chinese)
- [ 17 ] 史思强, 杨玉晶, 高林. 高弹改性沥青的流变性响应[J]. 公路交通科技, 2013, 30(2):14-18.  
SHI Siqiang, YANG Yujing, GAO Lin. Response of rheological behavior of modified asphalt with high elasticity [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(2):14-18. (in Chinese)
- [ 18 ] MOGHADDAM T B, BAAJ H. The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review [J]. Construction and Building Materials, 2016, 114:805-816.
- [ 19 ] 栗培龙, 张争奇, 王秉纲, 等. 道路沥青热氧老化模拟试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2008, 29(1):119-123.  
LI Peilong, ZHANG Zhengqi, WANG Binggang, et al. Experimental research on thermo-oxidative aging for simulation of pavement asphalt aging [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2008, 29(1):119-123. (in Chinese)