

# 基于黏弹性分析的复合改性生物沥青抗车辙性能评价

王 超, 季晓斌, 谢亭亭  
(北京工业大学城市建设学部, 北京 100124)

**摘要:** 为研究餐饮废油生物沥青的高温抗车辙性能及提升方法, 选用有机化蒙脱土 (organic montmorillonite, OMMT) 作为复合改性剂提升生物沥青的高温性能, 采用多应力蠕变恢复试验探究不同生物油和 OMMT 掺量以及差异化老化状态对各类沥青不可恢复蠕变柔量 ( $J_{nr}$ )、老化敏感性、应力敏感性等指标的影响, 并通过四参数 Burgers 模型对沥青的黏弹性流变参数进行分析。结果表明: 在不同老化状态下, 餐饮废油生物油的加入明显降低了石油沥青的高温抗车辙性能, 而进一步通过 OMMT 与生物油等掺量复合改性, 可使生物沥青的高温抗车辙能力至少恢复至石油沥青的水平, 且此高温性能改善效果在经历短期和长期老化后依然显著; 与石油沥青相比, 生物沥青的老化敏感性发生了略微升高, 进一步采用 OMMT 复合改性后, 老化敏感性整体上也呈现出增大趋势; 生物油掺量对沥青高温蠕变应力敏感性的影响远低于 OMMT 掺量和老化的作用, 高掺量 OMMT 复合改性措施的使用需受到应力敏感性要求的限制。此外, 基于四参数 Burgers 流变模型拟合分析发现, 随着生物油的加入沥青蠕变柔量的弹性比例及延迟弹性比例均呈减小趋势, 黏性蠕变柔量的占比增大, 而 OMMT 的使用与生物油具有完全相反的影响效应。

**关键词:** 餐饮废油; 生物沥青; 抗车辙性能; 蠕变与恢复; 有机化蒙脱土; Burgers 模型

中图分类号: U 141

文献标志码: A

文章编号: 0254 - 0037(2022)06 - 0667 - 09

doi: 10.11936/bjutxb2021110006

## Evaluation on Rutting Resistance and Performance of Compound Modified Bio-asphalt Based on Viscoelastic Analysis

WANG Chao, JI Xiaobin, XIE Tingting

(Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** To address the high temperature rutting resistance and performance improvement of waste cooking oil (WCO) based bio-asphalt, the organic montmorillonite (OMMT) was selected as the compound modifier to improve the high temperature performance of bio-asphalt. The multiple stress creep recovery test was utilized to quantify the influence of bio-oil and OMMT content as well as aging level on the non-recoverable creep compliance ( $J_{nr}$ ), aging sensitivity and stress sensitivity of various asphalt binders. Viscoelastic rheological parameters of the tested binders were also fitted from the four coefficients Burgers model. Test and analysis results show that the addition of WCO based bio-oil significantly reduces the high temperature rutting resistance of petroleum asphalt under various aging conditions. The further compound Bio/OMMT modification can reach the similar rutting resistance level of petroleum asphalt, in which the performance improvement is still effective after the short-term and long-term aging. The aging sensitivity of the bio-asphalt slightly increases when compared to the petroleum asphalt. Further, compound OMMT modification into bio-asphalt also shows an overall increasing trend of the

收稿日期: 2021-11-08; 修回日期: 2022-01-04

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(8174059); 北京市教育委员会科技计划一般资助项目(KM201810005020)

作者简介: 王 超(1986—), 副教授, 博士生导师, 主要从事沥青路面结构与材料方面的研究, E-mail: wangchao@bjut.edu.cn

aging sensitivity. The effect of bio-oil on the binder stress sensitivity at high temperature is much lower than that of the OMMT content and aging effect, and the use of high OMMT content should be limited from the stress sensitivity requirement. Additionally, the fitting results of four coefficients Burgers model show that the use of bio-oil modification decreases the proportion of elasticity and delayed elasticity in creep compliance but increases the viscous part. Meanwhile, the further OMMT compound modification displays the completely opposite impact on the creep compliance proportion of the bio-asphalt.

**Key words:** waste cooking oil; bio-asphalt; rutting resistance; creep and recovery; organic montmorillonite; burgers model

为应对全球石油资源短缺,实现沥青路面铺装技术的可持续发展,基于生物质资源利用的生物沥青新材料技术近年来得到广泛关注.生物油具有可再生、低碳环保等优点,可经过快速热裂解或分馏等提纯技术从农业或林业废弃物、餐饮废油、动物排泄物等生物质中提取. Yang 等<sup>[1]</sup>、Gao 等<sup>[2]</sup>发现以废木材为原料的生物油可以降低沥青混合料的拌和温度,提高沥青胶结料的高温性能,但却降低了中低温性能;高俊锋等<sup>[3-4]</sup>研究了不同木屑生物油掺量及温度下生物沥青的高温流变特性,发现生物沥青高温性能得到提升;He 等<sup>[5]</sup>对松木、柳木等制备的3种生物沥青性能进行分析,发现生物油的加入均能提高基质沥青的高温抗车辙性能;Lei 等<sup>[6]</sup>研究发现在橡胶沥青中加入玉米秸秆生物油复合改性后,沥青的高温性能和弹性性能均有所提高.然而,不同来源的生物油对改性沥青性能的影响有所不同,目前研究报道中除了基于农林业废弃生物质资源的生物油能提高沥青高温性能以外,大部分生物油改性剂普遍对沥青的高温性能带来不利影响,却不同程度地提高了沥青的中低温性能.诸如,Zeng 等<sup>[7]</sup>发现蓖麻油可提高沥青的低温抗裂性,但也导致了高温抗车辙性能的下降;廖晓锋等<sup>[8]</sup>发现基于植物油制备生物沥青的车辙因子、软化点和蠕变刚度等抗车辙性能指标均发生下降.因此,针对不同种类的生物沥青新材料,需具体分析生物油掺入所带来的路用功能优势与不足,并开展针对性的路用性能优化提升工作.例如,文献[9-11]将基于猪粪转化的生物油部分替代石油沥青,发现随着生物油的加入沥青的高温性能受到不利影响,为此进一步加入聚磷酸进行复合改性,发现可基本弥补生物油所导致的沥青高温性能不足问题.

以餐饮废油(waste cooking oil, WCO)为来源的生物沥青新材料开发近年来也得到较为普遍的关注和研究.王飞等<sup>[12]</sup>研究表明餐饮废油改性剂可以提高沥青及混合料的低温抗裂性,但是降低了其抗

车辙性和中温疲劳性能;Wang 等<sup>[13]</sup>研究发现基于WCO的生物油与基质沥青具有相近的化学官能团,随着生物油掺量的增加沥青的模量和抗车辙性能逐渐降低;Sun 等<sup>[14]</sup>将WCO与苯乙烯-丁二烯-苯乙烯三元嵌段共聚物(styrene butadiene styrene block copolymer, SBS)改性沥青混合,发现WCO的添加降低了SBS改性沥青的动态模量及高温抗车辙性能,但其对沥青的低温抗裂性有改善作用;Liu 等<sup>[15]</sup>对比了WCO/SBS/乙酸乙烯(ethylene vinyl acetate, EVA)改性沥青的流变特性,发现WCO改性手段对沥青高温性能产生显著负面影响.为弥补WCO生物沥青高温性能不足的问题,近期许多研究人员测试评价了复合改性措施的可行性. Azahar 等<sup>[16]</sup>通过化学改性降低了WCO生物沥青的酸值,发现可提高生物沥青的软化点和抗车辙能力;Zhang 等<sup>[17]</sup>发现经生物炭复合改性可提高WCO生物沥青的抗老化性能和抗车辙性能,并能保持良好的低温抗裂性.

本文在前期WCO生物沥青路用性能研究的基础上,针对此类生物沥青高温性能明显不足的普遍问题,进一步将有机化蒙脱土<sup>[18-19]</sup>作为复合改性剂以提高生物沥青的高温抗车辙能力,探究和对比不同生物油和有机化蒙脱土掺量条件下,生物沥青在不同老化状态的不可恢复蠕变柔量、老化敏感性、应力敏感性等指标的变化规律,并通过四参数Burgers模型对生物沥青的黏弹性开展深入分析.

## 1 材料与试验方法

### 1.1 试验原材料

本文采用北京地区道路工程建设养护中常用的石油沥青材料,针入度等级分别为70号和90号的基质沥青.生物油(bio-oil, Bio)选用北京某企业回收餐饮废油制备生物柴油过程中产生的副产品,该生物油材料外观与石油沥青较为相似,其外观颜色为黑褐色,在常温下具有一定的流动性,如图1所示.

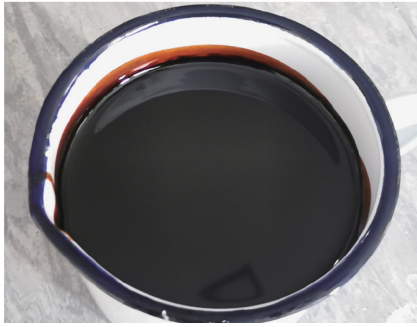


图1 餐饮废油重质生物油

Fig. 1 Bio-oil from waste cooking oil

本文选用浙江丰虹新材料有限公司生产的有机化蒙脱土 (organic montmorillonite, OMMT), 作为餐饮废油生物沥青的复合改性剂, OMMT 是一种天然的硅酸盐矿物, 集合体呈土状、球粒状等, 白色微带浅灰色, 土状光泽、有滑感, 其具体技术指标如表 1 所示。

## 1.2 生物沥青的制备

由于餐饮废油生物油是一种较为复杂的混合物, 其内部含有较多水分且各种组分的分布不均匀, 因此需要经过合理的预处理措施才可用于制备餐饮废油生物沥青。本文所采用的生物油预处理措施为: 使用高速搅拌机将生物油在  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $2\ 000\ \text{r}/\text{min}$  的条件下搅拌  $30\ \text{min}$ , 以有效去除生物油中多余的水分, 并使其内部各种组分分布更均匀。然后, 将预

表1 有机化蒙脱土技术指标

Table 1 Properties of organic montmorillonite

项目	技术指标
组成	蒙脱土有机衍生物
外观	米白色粉末
蒙脱石质量分数/%	96 ~ 98
表观密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	0.45
干粉粒度	99.9% 通过 200 目
径/厚比	200
层叠厚度/nm	$\leq 25$
含湿量/%	$\leq 3$

处理后的生物油与 70 号基质沥青 (N70) 分别加热到流动状态后按照 5:95 的比例混合, 将混合物放在高速搅拌机中以  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $2\ 000\ \text{r}/\text{min}$  的条件高速搅拌  $30\ \text{min}$ , 得到 N70 + 5% Bio 的餐饮废油生物沥青。类似地, 继续制备基于 90 号基质沥青 (N90) 的 3 种餐饮废油生物沥青, 以及 3 种有机化蒙脱土复合改性餐饮废油生物沥青 (简称复合改性生物沥青), 具体改性剂种类和掺量如表 2 所示。此外, 还对上述不同种类沥青胶结料进行了不同程度的老化模拟, 所涉及的样品老化水平包括: 原样沥青 (original binder, OB)、旋转薄膜烘箱 (rolling thin-film oven, RTFO) 短期老化、压力老化容器 (pressurized aging vessel, PAV) 长期老化和部分样品的超长期老化 (2 pressurized aging vessel, 2PAV)。

表2 不同种类生物沥青材料制备一览表

Table 2 Sample preparation of bio-asphalt materials

序号	基质沥青种类	测试样品 ID	改性剂种类	老化状态
1	70 号基质沥青	N70	无	OB、RTFO、PAV、2PAV
2		N70 + 5% Bio	5% Bio	
3	90 号基质沥青	N90	无	OB、RTFO、PAV
4		1% Bio	1% Bio	
5		3% Bio	3% Bio	
6		5% Bio	5% Bio	
7		1% Bio + 1% OMMT	1% Bio + 1% OMMT	
8	3% Bio + 3% OMMT	3% Bio + 3% OMMT		
9	5% Bio + 5% OMMT	5% Bio + 5% OMMT		

## 1.3 试验方法

### 1.3.1 旋转薄膜烘箱试验

对原样未老化沥青进行室内短期老化试验, 可模拟沥青胶结料在沥青混合料拌和、摊铺过程中发生的短期老化行为。短期老化试验采用了标准的 RTFO 试验, 该试验在  $163\text{ }^{\circ}\text{C}$  的旋转鼓风条件下将

沥青样品老化  $85\ \text{min}$ , 得到 RTFO 沥青样品用于路用性能测试或后续长期老化模拟。

### 1.3.2 压力老化容器试验

本文采用 PAV 试验来模拟沥青在路面设计使用年限内 (15 ~ 20 a) 发生的长期老化行为。该试验将经过短期老化后的沥青放入压力老化容器中, 在

100 ℃和2.1 MPa空气压力下持续老化20 h,然后将沥青在170 ℃条件下真空处理30 min获得PAV沥青样品.此外,本研究中对个别沥青样品进行了2轮PAV老化模拟,得到2PAV沥青样品,以分析在极端老化条件和环境下的沥青路用性能演化.

### 1.3.3 多应力蠕变恢复试验

多应力蠕变恢复(multiple stress creep recover, MSCR)试验分别选用0.1、3.2 kPa两种蠕变应力水平进行连续测试,每个应力水平进行10个蠕变-恢复周期,每个周期包括1 s的蠕变加载和9 s的卸载恢复,试验总时间为200 s.目前,基于MSCR试验的不可恢复蠕变柔量 $J_{nr}$ 指标是评价沥青高温抗车辙性能的主要技术指标,通过计算每个蠕变-恢复周期的 $J_{nr}$ ,进而将10个蠕变-恢复周期进行平均计算得到每个应力水平下的 $J_{nr}$ 代表值( $J_{nr0.1}$ 、 $J_{nr3.2}$ ).

$$J_{nr} = \frac{\gamma_{nr} - \gamma_0}{\tau} \quad (1)$$

式中: $\gamma_{nr}$ 为每个加载周期内的残留应变; $\gamma_0$ 为每个加载周期内的初始应变; $\tau$ 为剪切应力.此外,沥青 $J_{nr}$ 指标的应力敏感性可通过计算 $J_{nr-diff}$ 指标进行分析和评价,且

$$J_{nr-diff} = \frac{J_{nr3.2} - J_{nr0.1}}{J_{nr0.1}} \times 100\% \quad (2)$$

## 2 餐饮废油生物沥青高温抗车辙性能

### 2.1 复合改性生物沥青抗车辙性能提升效果评价

在未老化状态下,70号基质沥青(N70)与5%生物油掺量的生物沥青(N70+5%Bio)在MSCR试验中的蠕变恢复曲线如图2(a)所示,计算所得的 $J_{nr}$ 指标在图2(b)进行了比较.5%生物油的掺入明显降低了石油沥青的蠕变抗变形能力,0.1、3.2 kPa两个应力水平下的 $J_{nr}$ 指标也基本成倍增大,体现出更高的车辙变形累积,可见生物油对基质沥青具有一定的软化作用,降低了石油沥青的高温抗车辙性能.

鉴于生物油对沥青高温抗车辙性能的显著负面影响,进一步对Bio和OMMT复合改性措施进行了对比.如图3所示,在未老化状态下,在90号基质沥青(N90)中逐步提高生物油的掺量,沥青的永久变形累积逐渐增加,不同应力水平的 $J_{nr}$ 指标逐步增大,沥青的高温抗车辙性能逐渐降低;然而,进一步将OMMT与Bio等掺量加入时,可使复合改性生物沥青的抗变形能力基本达到基质沥青水平,即弥补了生物油对基质沥青软化所带来的高温性能不足,

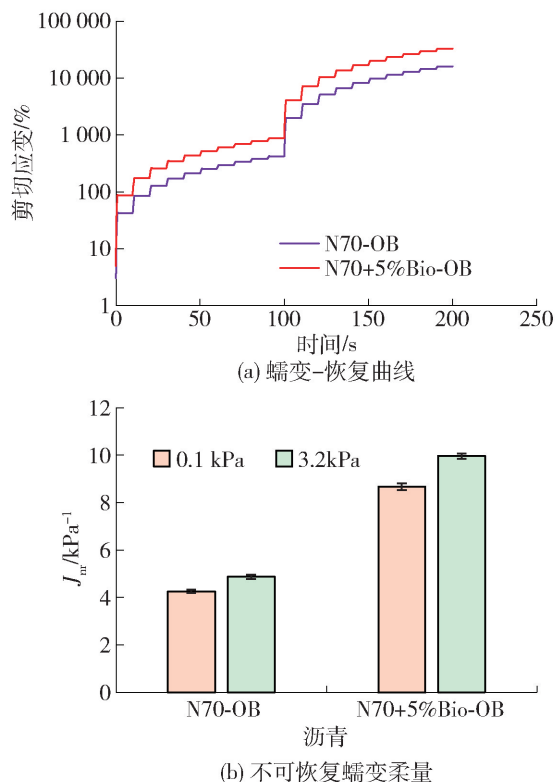


图2 原样未老生物沥青MSCR试验结果分析

Fig.2 MSCR test results of un-aged bio-asphalt

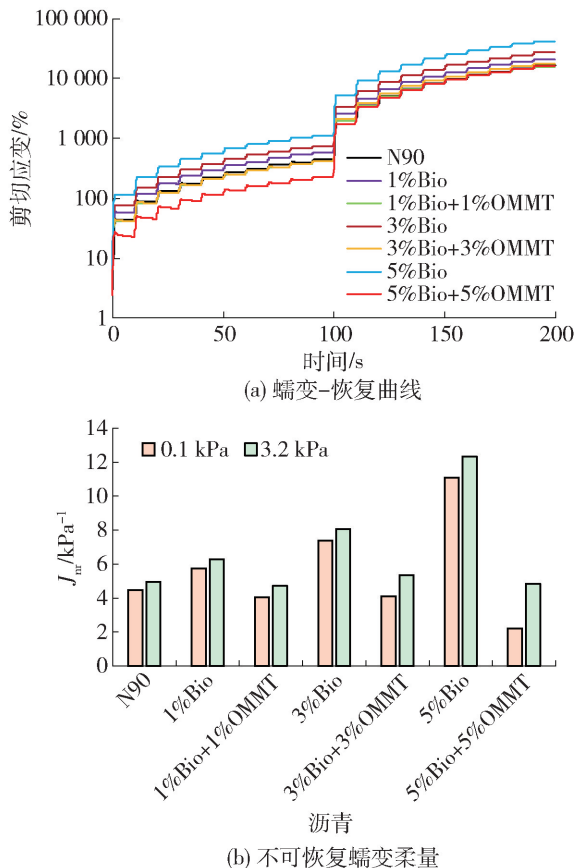


图3 原样未老化复合改性生物沥青MSCR试验结果分析

Fig.3 MSCR test results of un-aged Bio/OMMT asphalt



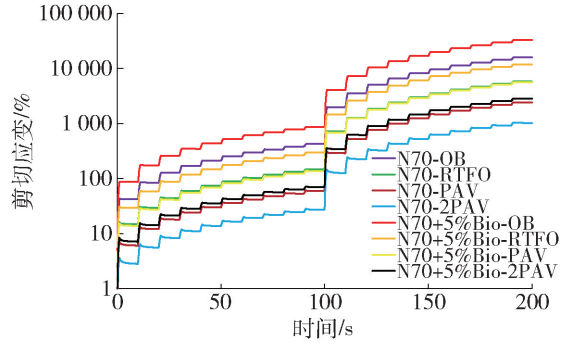
因此,OMMT 有希望作为改善餐饮废油生物沥青高温抗车辙性能的复合改性剂进行使用.

### 2.2 老化对餐饮废油生物沥青高温抗车辙性能影响

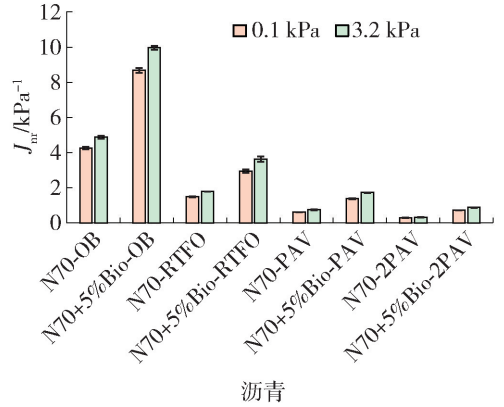
基于 70 号沥青制备的普通生物沥青 (N70 + 5% Bio) 和基质沥青在 4 种老化状态下的 MSCR 试验分析结果如图 4 所示. 随着老化程度的加深,沥青模量水平的提高有助于高温抗车辙性能的提升,从蠕变-恢复曲线和  $J_{nr}$  指标来看普通生物沥青也符合这一规律现象. 但是,不同老化水平下生物油的掺加对沥青的软化效应依然显著,即便到 2 倍 PAV 老化时长的 2PAV,生物沥青依然体现出相对较高的  $J_{nr}$  水平,可见生物油对沥青高温性能的负面影响随着沥青老化的发生有所缓解但并未根本消除.

进一步对比了不同老化状态下复合改性生物沥青  $J_{nr}$  指标计算结果,如图 5 所示. 已证明的 OMMT 复合改性措施对生物沥青高温性能的改善提升效果在经历了短期和长期老化后依然显著. 不同生物油掺量下,等掺量使用 OMMT 的复合改性生物沥青的  $J_{nr}$  指标基本与基质沥青保持在同一水平,且在低应力水平 (0.1 kPa) 下,发现复合改性生物沥青的高温抗车辙性能不同程度地优于基质沥青,尽管这一优势并未延续到高应力水平 (3.2 kPa),但充分证明了 Bio/OMMT 复合改性措施的必要性和技术可行性.

本文进一步采用“标准化的  $J_{nr}$  指标”评价生物沥青的老化敏感性,该方法以沥青未老化状态的  $J_{nr}$  值为标准值,将相同沥青样品不同老化状态下的  $J_{nr}$  值与标准值的比值作为标准化  $J_{nr}$  指标 (介于 0 ~ 1 之间),相同老化状态下,标准化  $J_{nr}$  值越大说明沥青



(a) 蠕变-恢复曲线



(b) 不可恢复蠕变柔量

图 4 生物沥青不同老化水平 MSCR 试验结果分析  
Fig. 4 MSCR test results of bio-asphalt at various aging levels

的老化敏感性越低. 70 号和 90 号石油沥青所制备的生物沥青在不同老化状态下的标准化  $J_{nr}$  指标计算结果分别如表 3、4 所示. 从表 3 中初步可以看出,在任意老化状态下沥青样品的标准化  $J_{nr}$  指标并不受蠕变应力水平的影响,且掺加 5% 生物油的生

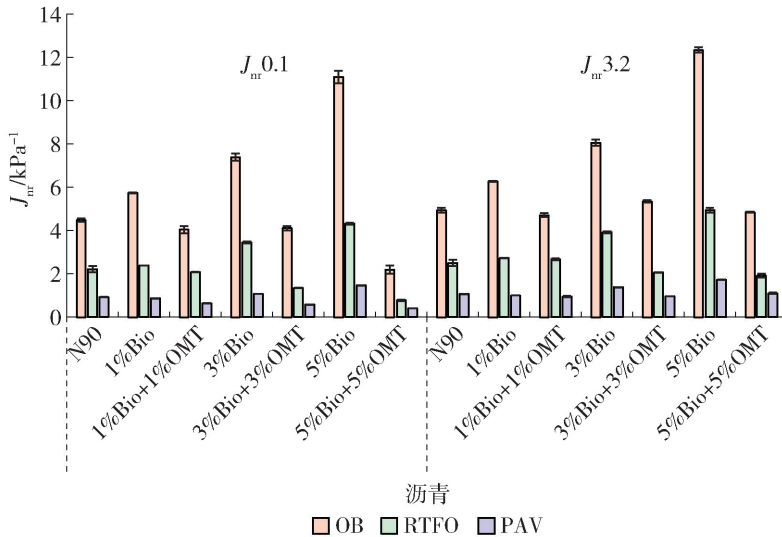


图 5 复合改性生物沥青不同老化水平不可恢复蠕变柔量 ( $J_{nr}$ ) 对比

Fig. 5 Comparison of non-recoverable creep compliance ( $J_{nr}$ ) of Bio/OMMT modified asphalt under various aging levels

物沥青与基质沥青的老化敏感性基本保持了一致。但从表4中可以发现,当使用90号沥青为基质沥青时,随着生物油掺量的增加,生物沥青的老化敏感性略微升高,进一步采用OMMT复合改性后,老化敏

感性整体上也呈现出增大趋势。因此,对于复合改性餐饮废油生物沥青材料制备及应用,需尤其关注沥青老化可能带来的路用性能演变差异。

表3 生物沥青老化敏感性分析

Table 3 Analysis of aging sensitivity of bio-asphalt

沥青种类	老化状态	$J_{m0.1}$	标准化 $J_{m0.1}$	$J_{m3.2}$	标准化 $J_{m3.2}$
N70	OB	4.25	1.00	4.87	1.00
	RTFO	1.47	0.35	1.77	0.36
	PAV	0.59	0.14	0.73	0.15
	2PAV	0.27	0.06	0.31	0.06
N70 + 5% Bio	OB	8.68	1.00	9.96	1.00
	RTFO	2.94	0.34	3.61	0.36
	PAV	1.36	0.16	1.71	0.17
	2PAV	0.70	0.08	0.86	0.09

表4 复合改性生物沥青老化敏感性分析

Table 4 Analysis of aging sensitivity of Bio/OMMT modified asphalt

沥青种类	标准化 $J_{m0.1}$			标准化 $J_{m3.2}$		
	OB	RTFO	PAV	OB	RTFO	PAV
N90	1	0.49	0.21	1	0.51	0.22
1% Bio	1	0.42	0.15	1	0.44	0.16
3% Bio	1	0.47	0.15	1	0.49	0.17
5% Bio	1	0.39	0.13	1	0.40	0.14
1% Bio + 1% OMMT	1	0.51	0.16	1	0.57	0.20
3% Bio + 3% OMMT	1	0.33	0.14	1	0.39	0.18
5% Bio + 5% OMMT	1	0.35	0.19	1	0.39	0.23

### 2.3 餐饮废油生物沥青高温蠕变应力敏感性分析

不同蠕变应力水平下的沥青高温抗车辙性能往往体现出明显差异,基于  $J_{nr-diff}$  指标的复合改性生物沥青蠕变应力敏感性分析结果如图6所示。可以看出,生物油掺量对沥青应力敏感性的影响远低于OMMT掺量和老化的作用,沥青的应力敏感性随着老化程度的加深呈现出逐渐增大的趋势,且随着OMMT复合改性措施的使用,沥青的应力敏感性响应更加迅速,尤其当OMMT掺量达到5%时,复合改性生物沥青的应力敏感性出现急剧上升。AASHTO MP19-2010规范<sup>[20]</sup>对  $J_{nr-diff}$  指标的限制要求是 < 75%,显然掺入5% OMMT的复合改性沥青均远超出指标阈值,因此,5% Bio + 5% OMMT复合改性生物沥青已经达到蠕变破坏阶段,不符合规范技术标准,即复合改性措施的使用受到了应力敏感性要求的限制。

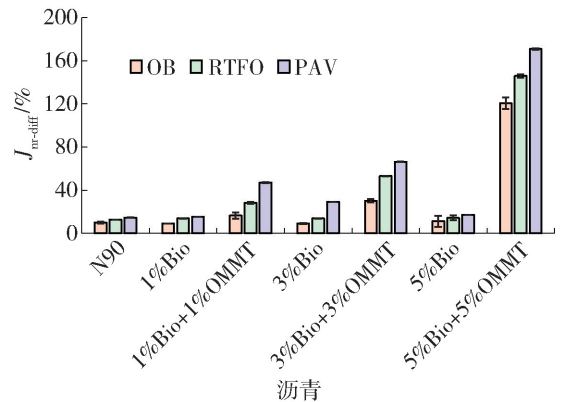


图6 复合改性生物沥青应力敏感性分析

Fig.6 Stress sensitivity of Bio/OMMT modified asphalt

## 3 四参数 Burgers 流变模型拟合分析

### 3.1 四参数 Burgers 模型

四参数 Burgers 模型为目前使用广泛的黏弹性

力学模型,且能较好地反应沥青基材料的黏弹特性.该黏弹性模型由一组 Maxwell 模型与一组 Kelvin 模型串联组成,可反映黏弹性材料的瞬时弹性应变、黏弹性应变和黏性应变<sup>[21-22]</sup>.模型中一般包含2个方程,一个为输入恒定应力作用下的蠕变加载方程,另一个为输入恒定应变的应力松弛模式方程,2个方程间可以通过拉普拉斯变换及逆变换得到<sup>[23]</sup>,本研究中采用恒定应力蠕变加载的模式,其本构方程为

$$\frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} = \frac{1}{E_M} + \frac{t}{\eta_M} + \frac{1}{E_K}(1 - e^{-tE_K/\eta_K}) \quad (3)$$

式中: $\varepsilon$ 为应变; $\sigma_0$ 为加载应力,kPa; $t$ 为加载时间; $E_M$ 、 $\eta_M$ 分别为 Maxwell 模型中弹簧元件的弹性模量以及黏壶元件的黏性系数; $E_K$ 、 $\eta_K$ 分别为 Kelvin 模型中弹簧元件的弹性模量以及黏壶元件的黏性系数. $E_M$ 反映了沥青高温下的弹性变形能力, $\eta_M$ 反映了不可恢复变形的黏性系数,与沥青的永久变形有关; $E_K$ 、 $\eta_K$ 则反映了在常温荷载作用条件以及长时间荷载下,沥青延迟恢复变形的能力.

黏弹性沥青材料在蠕变加载作用下的蠕变柔量  $J$  一般分为三部分,即

$$J(t) = J_e + J_{ev}(1 - e^{-t/J_{ev}}) + J_v \quad (4)$$

式中: $J_e = 1/E_M$ 为弹性柔量; $J_{ev} = \eta_K/E_K$ 为延迟弹性柔量或黏弹性柔量; $J_v = t/\eta_M$ 为黏性柔量.

### 3.2 蠕变劲度的黏性部分 $G_v$

美国 NCHRP 9-10 课题曾提出基于“蠕变劲度的黏性部分 ( $G_v$ ,且  $G_v = 1/J_v$ )”来评价沥青胶结料

的高温抗车辙能力, $G_v$ 参数越大说明沥青的高温抗变形能力越好<sup>[24]</sup>.本文对所测试沥青样品的蠕变恢复行为进行了基于四参数 Burgers 模型的分析,分别选取2个蠕变应力水平下的第5次蠕变-恢复循环进行模型拟合,计算得到蠕变劲度的黏性部分  $G_v$  指标,如图7所示.可以看出在各老化状态下随着生物油的加入,生物沥青  $G_v$  参数呈现出不断减小的趋势,而 OMMT 的加入则不同程度上提升了生物沥青的  $G_v$  值,使得复合改性生物沥青的抗车辙性能基本达到甚至优于基质沥青的水平,与前述基于 MSCR 试验  $J_m$  评价指标的分析结果基本保持一致.因此,通过  $J_m$  指标的沥青高温抗车辙性能评价与基于四参数 Burgers 模型的拟合分析具有等效性,在实践中可采用计算方法更为简便的  $J_m$  指标快速区分和评价生物沥青的高温性能.

### 3.3 黏弹性分量对比

基于四参数 Burgers 模型拟合结果,可进一步针对沥青在 MSCR 试验蠕变恢复过程中的瞬时弹性柔量、延迟弹性柔量和黏性柔量3个部分进行对比分析,如图8所示.可以看出,在0.1 kPa 较低蠕变应力下,随着生物油的加入沥青的弹性柔量及延迟弹性柔量的比例均呈减小趋势,黏性柔量的占比增大,而 OMMT 的加入与生物油具有完全相反的影响效应,同时老化程度的加深同样使得沥青黏性柔量比例明显减少,弹性柔量和延迟弹性柔量的占比普遍增加;但是在3.2 kPa 较高蠕变应力下,未老化与短期老化状态下的沥青样品基本仅体现为弹性柔量与

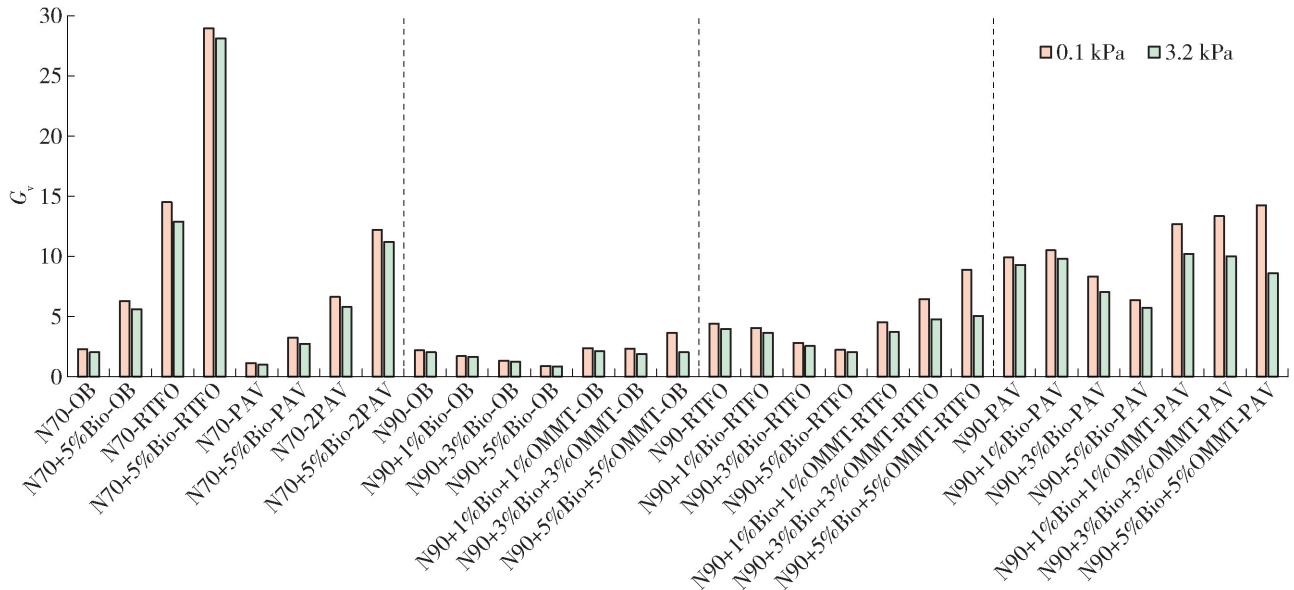


图7 不同沥青样品的  $G_v$  参数拟合值

Fig. 7 Fitting results of  $G_v$  parameter for different asphalt

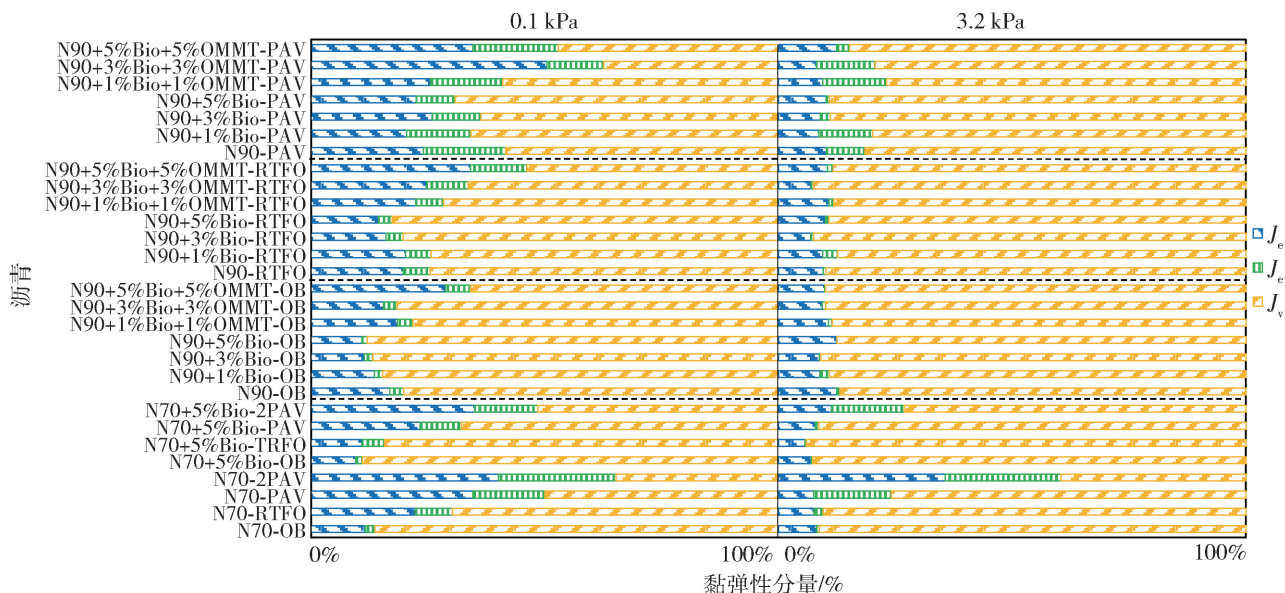


图8 MSCR 试验中不同沥青蠕变柔量黏弹性分量对比

Fig. 8 Comparison of viscoelastic component in creep compliance for different asphalt during MSCR test

黏性柔量,延迟弹性柔量普遍占比极低,仅长期老化和超长期老化后的沥青样品体现出一定的延迟弹性柔量占比,且整体变化规律与低应力水平结果基本接近,说明蠕变应力水平对于餐饮废油生物沥青蠕变恢复过程中的黏弹性分量分析至关重要。

## 4 结论

1) 餐饮废油生物油的加入明显降低了石油沥青的高温抗变形能力,而将 OMMT 与生物油等掺量复合改性使用,可将生物沥青的高温抗车辙性能基本恢复至石油沥青的水平。

2) 生物油对沥青高温性能的负面影响随着沥青老化有所缓解却并未根本消除,但 OMMT 复合改性措施对生物沥青高温性能的改善效果在短期和长期老化后依然显著. 与石油沥青相比,生物沥青的老化敏感性发生了略微升高,进一步采用 OMMT 复合改性后,老化敏感性整体上也呈现出增大趋势。

3) 生物油掺量对沥青高温蠕变应力敏感性的影响远低于 OMMT 掺量和老化的作用,生物沥青的应力敏感性随着老化程度的加深呈现出逐渐增大的趋势,且随着 OMMT 复合改性措施的采用,应力敏感性响应更加迅速,因此高掺量 OMMT 复合改性措施的采用受到应力敏感性要求的限制。

4) 基于四参数 Burgers 模型的拟合分析与不可恢复蠕变柔量  $J_m$  指标分析具有等效性,在实践中可采用  $J_m$  指标快速区分和评价生物沥青的高温性能. 随着生物油的加入,沥青的弹性变形及延迟弹性变

形比例均呈减小趋势,黏性变形的占比增大,而 OMMT 的使用与生物油具有完全相反的影响效应。

## 参考文献:

- [1] YANG X, YOU Z P, DAI Q L. Performance evaluation of asphalt binder modified by bio-oil generated from waste wood resources [J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2013, 6(4): 431-439.
- [2] GAO J F, WANG H N, YOU Z P, et al. Research on properties of bio-asphalt binders based on time and frequency sweep test [J]. Construction and Building Materials, 2018, 160: 786-793.
- [3] 高俊锋,汪海年,尤占平,等. 基于 MSCR 试验的生物沥青高温性能评价[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(11): 24-30.  
GAO J F, WANG H N, YOU Z P, et al. Evaluation of high temperature performance of bio-asphalt in MSCR test [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(11): 24-30. (in Chinese)
- [4] 高俊锋,汪海年,尤占平,等. SBS 改性生物沥青结合料高温流变特性[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(2): 293-302.  
GAO J F, WANG H N, YOU Z P, et al. High temperature rheological properties on SBS modified bio-binder [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2018, 34(2): 293-302. (in Chinese)
- [5] HE M, TU C, CAO D W, et al. Comparative analysis of



- bio-binder properties derived from different sources [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2017, 20(7): 792-800.
- [6] LEI Y, WANG H N, 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.
- [7] ZENG M L, PAN H Z, ZHAO Y, et al. Evaluation of asphalt binder containing castor oil-based bioasphalt using conventional tests [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 126: 537-543.
- [8] 廖晓锋, 雷茂锦, 陈忠达, 等. 生物结合料共混沥青的路用性能试验研究[J]. *材料导报*, 2014, 28(2): 144-149.
- LIAO X F, LEI M J, CHEN Z D, et al. Experimental research on the pavement performance of bio-binder maxing asphalt [J]. *Material Review*, 2014, 28(2): 144-149. (in Chinese)
- [9] FINI E H, KALBERER E W, SHAHBAZI A, et al. Chemical characterization of biobinder from swine manure sustainable modifier for asphalt binder [J]. *American Society of Civil Engineers*, 2011, 23(11): 1506-1513.
- [10] FINI E H, AL-QADI I L, YOU Z P, et al. Partial replacement of asphalt binder with bio-binder characterisation and modification [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2012, 13(6): 515-522.
- [11] OLDHAM D, FINI E H, CHAILLEUX E. Application of a bio-binder as a rejuvenator for wet processed asphalt shingles in pavement construction [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 86: 75-84.
- [12] 王飞, 李晓娟, WEN H, 等. 基于废食用油的生物结合料共混沥青及其混合料性能研究 [J]. *中外公路*, 2015, 35(6): 264-268.
- WANG F, LI X J, WEN H, et al. Study on bio-binder blended asphalt based on waste cooking oil and its mixture properties [J]. *Journal of China and Foreign Highway*, 2015, 35(6): 264-268. (in Chinese)
- [13] WANG C, XUE L, XIE W, et al. Laboratory investigation on chemical and rheological properties of bio-asphalt binders incorporating waste cooking oil [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 167: 348-358.
- [14] SUN Z, YI J, CHEN Z, et al. Chemical and rheological properties of polymer modified bitumen incorporating bio-oil derived from waste cooking oil [J]. *Materials and Structures*, 2019, 52(5): 1-11.
- [15] LIU S J, ZHOU S, PENG A H, et al. Investigation of physiochemical and rheological properties of waste cooking oil/SBS/EVA composite modified petroleum asphalt [J]. *Journal of Applied Science*, 2020, 137(26): 48828.
- [16] AZAHAR W N A W, JAYA R P, HAININ M R, et al. Chemical modification of waste cooking oil to improve the physical and rheological properties of asphalt binder [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 126: 218-226.
- [17] ZHANG R, DAI Q L, YOU Z P, et al. Rheological performance of bio-char modified asphalt with different particle sizes [J]. *Applied Sciences-Basel*, 2018, 8(9): 1665.
- [18] FANG C Q, YU R E, ZHANG Y, et al. Combined modification of asphalt with polyethylene packaging waste and organophilic montmorillonite [J]. *Polymer Testing*, 2012, 31(2): 276-281.
- [19] FANG C Q, LIU X L, YU R E, et al. Preparation and properties of asphalt modified with a composite composed of waste package poly (vinyl chloride) and organic montmorillonite [J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2014, 30(12): 1304-1310.
- [20] AASHTO. Standard specification for performance graded asphalt binder using multiple stress creep recovery (MSCR) test: AASHTO MP19[S]. Washington D. C.: AASHTO, 2010.
- [21] SHENOY A. Refinement of the superpave specification parameter for performance grading of asphalt [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2001, 127(5): 357-362.
- [22] DELGADILLO R, BAHIA H U, LAKES R. A nonlinear constitutive relationship for asphalt binders [J]. *Materials and Structures*, 2012, 45(3): 457-473.
- [23] KUMAR R, SABOO N, KUMAR P, et al. Effect of warm mix additives on creep and recovery response of conventional and polymer modified asphalt binders [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 138: 352-362.
- [24] BAHIA U H, HANSON I D, ZENG M, et al. Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design [R]. Washington D. C.: Transportation Research Board, 2001.

(责任编辑 杨开英)