

## 生物沥青及岩沥青复合改性沥青使用性能

曾梦澜<sup>†</sup>, 祝文强, 夏颖林, 李君峰  
(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**为研究生物沥青及岩沥青复合改性沥青结合料使用性能,在 60% 范围内对不同掺量(质量)生物沥青及岩沥青复合改性沥青进行针入度、软化点、延度、黏度和 RTFO 短期老化试验,考察基质沥青在生物沥青和岩沥青复合改性作用下各性能的变化.试验结果与分析表明:在保持生物沥青及岩沥青复合改性沥青结合料与对照组基质沥青结合料的 25 °C 针入度一致时,岩沥青与生物沥青的比值和复合改性剂的掺量变化成正比例关系;复合改性沥青针入度指数 PI 值增大,温度敏感性得到改善;复合改性沥青的高温性能先略有降低而后一直提升,复合改性剂掺量约为 15% 时达到对照组基质沥青水平;复合改性沥青 RTFO 后残留针入度比先略有减小而后一直增大,复合改性剂掺量约为 20% 时达到对照组基质沥青水平,软化点变化提升明显;然而,沥青的延度随着复合改性剂的掺入而大幅降低,但沥青混合料弯曲试验对低温性能的验证显示,复合改性剂的掺量不超过 30% 时,复合改性剂的掺入不会降低沥青的低温性能,反而有一定改善.综上所述,在 20%~30% 掺量范围内,将复合改性剂替代部分石油沥青不会降低沥青的各类性能,甚至均有一定提高,且适应不同性能要求时掺量范围上限或下限可适当放宽.

**关键词:**生物沥青;岩沥青;复合改性;使用性能

**中图分类号:**U416.217

**文献标志码:**A

## Performance of Bio-asphalt and Rock Asphalt Composite Modified Asphalt

ZENG Menglan<sup>†</sup>, ZHU Wenqiang, XIA Yinglin, LI Junfeng  
(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** This paper studied the performance of bio-asphalt and rock asphalt composite modified asphalt binder. To investigate the change of the properties of asphalt subjected to the composite modification of bio-asphalt and rock asphalt, tests on the penetration, softening point, ductility, viscosity and RTFO short-term aging of the bio-asphalt and rock asphalt composite modified asphalt binder with different content in the range of 60% were carried out. The test results and analysis indicate that when the 25 °C penetration of bio-asphalt and rock asphalt composite

\* 收稿日期:2018-05-08

基金项目:湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目(201110), Advance and Innovation Project in Science and Technology of Department of Transportation of Hunan Province (201110)

作者简介:曾梦澜(1954—),男,湖南汉寿人,湖南大学教授,博士

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: menglanzeng@hnu.edu.cn

modified asphalt is consistent with the base asphalt binder, the ratio of rock asphalt to bio-asphalt are proportional to the content of composite modifier; The penetration index PI value of composite modified asphalt binder increases and the temperature sensitivity improves. The high temperature performance of composite modified asphalt decreases slightly first and then increases, and reaches its original level when the content of composite modifier is about 15%; The retained penetration of composite modified asphalt after RTFO decreases slightly first and then increases always, and finally reaches its original level when the content of composite modifier is about 20%, and the change of softening point increases obviously; However, the ductility of asphalt decreases significantly with the addition of the composite modifier. However, the bending test of asphalt mixture demonstrates that the addition of composite modifier does not decrease the low temperature performance of asphalt and improves it to some extent. In a whole, within the content from 20% to 30%, replacing some petroleum asphalt with compound modifier improves the performance of asphalt. Furthermore, the upper or lower content limit can be broadened appropriately when different performance requirements are to be met.

**Key words:** bio-asphalt; rock asphalt; composite modification; performance

随着公路交通建设的突飞猛进和道路里程不断增加,用于建设沥青路面的石油沥青需求量也在不断增加.然而石油属于不可再生资源,经过量开采和大量消费后,石油资源必将逐渐枯竭,因此寻找一种可替代石油沥青的可再生铺筑材料迫在眉睫<sup>[1-3]</sup>.

生物沥青作为一种可再生的新型沥青替代品,近年来越来越受到学者们的重视.当生物沥青掺入石油沥青中时,沥青的低温性能得到改善,然而对其高温稳定性及抗老化性能产生不利影响,这就不利于大幅度提高生物沥青的掺配比例、减少石油沥青用量<sup>[4]</sup>.因而,有必要对生物沥青改性沥青进行复合改性.

在众多沥青改性技术中,岩沥青改性是现阶段应用较广泛、较成熟的技术之一,其应用不仅在很大程度上降低了道路病害产生的频率,而且有效延长了沥青路面的使用年限.因而,利用岩沥青改性技术能获取高品质的改性沥青.但与此同时,岩沥青改性沥青存在着一定的局限性:岩沥青改性沥青

显著提高了基质石油沥青的高温性能及沥青路面的抗车辙能力,但同时对于沥青的低温性能产生了不利影响<sup>[5]</sup>.

本研究拟采用生物沥青和岩沥青两种改性效果几乎相反的改性剂对基质石油沥青进行复合改性,其复合改性的效果作为掺入生物沥青及岩沥青复合改性剂的效果进行整体研究.在本文的试验研究中,在基质沥青中掺入复合改性剂制成生物沥青及岩沥青复合改性沥青结合料,然后对其进行针入度、软化点、延度及 RTFO 短期老化方面的试验,研究生物沥青及岩沥青复合改性沥青的温度敏感性、高温性能、低温性能及抗老化性能,为生物沥青及岩沥青复合改性沥青的工程应用奠定理论基础.

## 1 试验材料

1) 基质沥青:基质沥青采用 70 号 A 级道路石油沥青,基质沥青的技术指标<sup>[6]</sup>见表 1.

表 1 基质沥青技术指标

Tab.1 Technical properties of asphalt

技术指标	针入度(25℃) /(0.1 mm)	针入度指数 PI 值	软化点 /℃	延度(15℃) /cm	闪点 /℃	溶解度 /%	密度(15℃) /(g·cm <sup>-3</sup> )	RTFO 试验后	
								质量变化率/%	25℃残留针入度比/%
试验结果	71.8	-1.3	46.3	>100	262	99.9	1.014	0.07	62.6
技术要求	60~80	-1.5~+1.0	≥46	≥100	≥260	≥99.5	实测	≤0.8	≥61

2)生物沥青:本研究采用的生物沥青为蓖麻油植物沥青,其原料是蓖麻子,蓖麻子经加工获取蓖麻油后,剩余的下脚油再经过一系列的物理化学工艺处置,最终获得植物沥青.外观上,这种蓖麻油植物沥青与石油沥青基本类似,常温下为黑色固体,颜色稍偏淡.

3)岩沥青:岩沥青采用欧洲岩沥青,但由于国内暂无欧洲岩沥青技术标准,表2中列出了青川岩沥青技术标准<sup>[7]</sup>.

表2 岩沥青技术标准

Tab.2 Technical properties of rock asphalt

技术指标	灰分质量 分数/%	含水率 /%	粒度范围/%		
			4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm
试验结果	9.6	0.42	100	100	86
技术要求	≤15	≤2	100	95~100	>80

## 2 实验室试验

### 2.1 复合改性沥青的制备

沥青的稠度综合反映了沥青结合料的内黏性和弹性抵抗变形能力,通常仅限于体现不高于60℃条件时沥青的黏稠程度<sup>[8]</sup>.岩沥青对基质沥青进行改性时,使得岩沥青改性沥青变硬,稠度变大;而生物沥青对基质沥青进行改性时,使得生物沥青改性沥青变软,稠度变小.针入度反映了沥青的稠度大小和软硬程度,是我国选择沥青标号的主要依据.为确保采用复合改性剂替代部分石油沥青后,复合改性沥青的沥青标号仍保持不变,以方便其工程应用.因此本次试验在进行沥青复合改性研究中,保持改性沥青的25℃针入度为不变量,以对照组基质沥青25℃针入度为标准,通过保持生物沥青及岩沥青复合改性沥青与对照组基质沥青的25℃针入度一致,来确定复合改性剂不同掺量时岩沥青与生物沥青的掺配比例,从而制备生物沥青及岩沥青复合改性沥青结合料.

把岩沥青依照预定的掺配比例掺入基质沥青中,然后在160℃温度下用搅拌机以1500 r/min的转速搅拌30 min,使得岩沥青和基质沥青充分混合.然后在155~165℃温度下用高速剪切仪以3000 r/min的转速剪切1 h.剪切完成后,待剪切仪中的温度降至145℃时,再按照预定的掺配比例加入生物沥青,以1500 r/min的转速搅拌30 min.本研究设定复合改性剂掺量为沥青总量的10%、20%、30%、

40%、50%和60%.其中对照组基质沥青采用与改性沥青同样的制备过程,得到零掺量试样.经过沥青针入度试验,得到对照组零掺量试样的25℃针入度为62.1(0.1 mm),以25℃针入度为62.1(0.1 mm)(可允许小范围内有一定波动)为生物沥青及岩沥青复合改性沥青制样成功.复合改性剂掺量分别为10%~60%时,调整每种掺量下岩沥青与生物沥青的掺配比例,制得每种掺量下岩沥青与生物沥青多种掺配比例的复合改性沥青,然后进行25℃针入度试验.经过多次探索性针入度试验,最终得到生物沥青及岩沥青复合改性沥青25℃针入度值最接近62.1(0.1 mm)时,不同掺量复合改性剂的岩沥青与生物沥青掺配比例,试验结果见表3.

表3 生物沥青及岩沥青复合改性沥青针入度试验结果

Tab.3 The result of penetration tests of bio-asphalt and rock composite modified asphalt

复合改性剂 掺量/%	$m_{\text{岩沥青}} : m_{\text{生物沥青}}$	针入度(25℃) /(0.1mm)
0	—	62.1
10	1 : 9(0.111)	64.5
20	4 : 16(0.25)	61.0
30	8 : 22(0.363)	63.2
40	12 : 28(0.428)	63.6
50	17 : 33(0.515)	60.6
60	24 : 36(0.667)	62.5

### 2.2 改性沥青性能测试

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)进行针入度、软化点、延度、黏度和老化试验<sup>[9]</sup>.采用试验规程T0604—2011试验方法进行针入度试验;采用试验规程T0606—2011试验方法进行软化点试验;采用试验规程T0605—2011试验方法进行延度试验;采用试验规程T0625—2011试验方法进行黏度试验;采用试验规程T0610—2011试验方法进行老化试验.

## 3 试验结果分析

### 3.1 针入度试验结果

本次试验研究以对照组基质沥青25℃针入度为标准,保持改性沥青与对照组基质沥青25℃针入度一致,通过表3可确定复合改性剂各种掺量下岩沥青与生物沥青的掺配比例.其掺配比例的比值与

复合改性剂掺量的变化关系如图 1 所示。

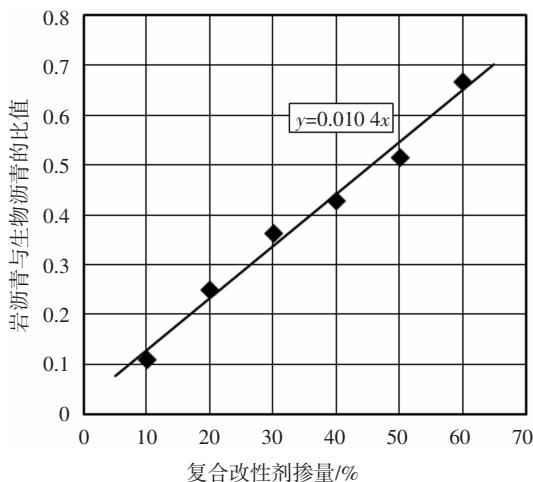


图 1 复合改性剂不同掺量时岩沥青与生物沥青的比值  
Fig.1 Ratio of Rock-bitumen and Bio-asphalt with different content of composite modifier

图 1 显示,随着复合改性剂掺量的逐渐增加,岩沥青与生物沥青掺配比例的比值也逐渐增大,其比值大小与复合改性剂掺量变化呈良好的正比例关系,经线性回归后可确定公式为  $y = 0.010 4x$ 。因此复合改性剂任何掺量时,均可确定生物沥青和岩沥青的掺配比例,故保持改性沥青 25 °C 针入度不变的试验条件具有通用性。

沥青结合料感温性能常用针入度指数 PI 值进行评价,一般认为,PI 值越大,温度变化对沥青结合料的性能影响越小,感温性能越好<sup>[10]</sup>。针入度指数 PI 值按照 JTG E20-2011 规程中 T0604-2011 “沥青针入度试验方法”中的针入度指数公式法进行计算。将 5 °C、15 °C 以及 25 °C 三个温度下测得的针入度值取对数,然后与温度进行线性回归,如式(2),可求得针入度温度指数  $A_{lg Pen}$ ,再将其代入式(1),即可计算得到针入度指数 PI 值<sup>[9]</sup>。生物沥青及岩沥青复合改性沥青的针入度指数 PI 值随复合改性剂掺量的变化如图 2 所示。

$$PI = \frac{20 - 500A_{lg Pen}}{1 + 50A_{lg Pen}}, \quad (1)$$

$$\lg P = K + A_{lg Pen} \times T. \quad (2)$$

式中: $T$  为针入度试验温度; $\lg P$  为针入度值的对数; $K$  为方程的常数项; $a$ ;  $A_{lg Pen}$  为方程的系数  $b$ 。

图 2 显示,随着复合改性剂掺量的增加,复合改性沥青的 PI 值逐渐增大,当复合改性剂掺量从 0% 增加到 60% 时,PI 值由 -1.3 增加到 1.4,增量显著。表明掺入复合改性剂后沥青的温度敏感性降低,沥青性能受到温度变化的影响减小,复合改性

沥青的感温性能得到极大改善。另外,当复合改性剂掺量为 50% 和 60% 时,改性沥青的 PI 值分别为 1.1 和 1.4。根据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004)的技术要求,道路 A 级石油沥青的 PI 值一般在 -1.5~1.0 之间,但对改性沥青的 PI 值暂无规范要求,一般不宜超过 2.0<sup>[11]</sup>。

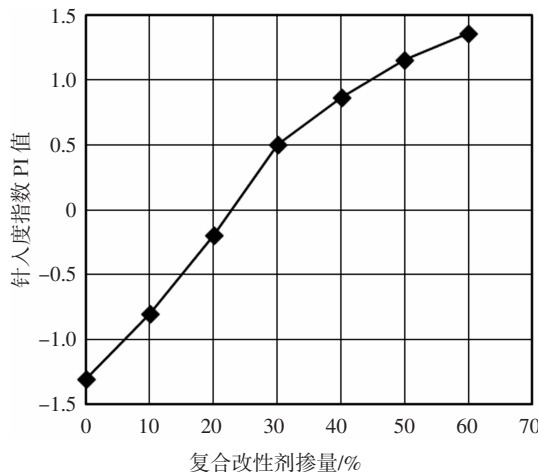


图 2 针入度指数 PI 值随复合改性剂掺量的变化  
Fig.2 The change of PI value of penetration index with the content of composite modifier

### 3.2 软化点试验结果

软化点描述的是沥青从黏塑性状态转变为黏流状态的临界温度,本质上反映的是一种沥青的条件黏度。沥青的高温性能一般用软化点的高低进行评价。由于高温会影响到沥青结合料的黏弹性,使得沥青变软,因而所采用的沥青软化点越高,高温性能也就越好。生物沥青及岩沥青复合改性沥青的软化点随复合改性剂的掺量变化如图 3 所示。

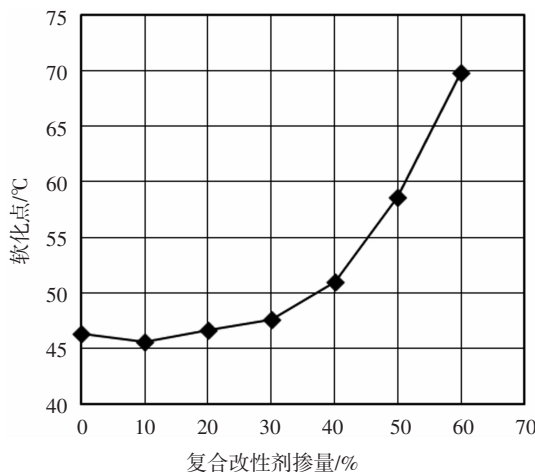


图 3 软化点随复合改性剂掺量的变化  
Fig.3 The change of softening point with the content of composite modifier

图3显示,当复合改性剂的掺量为10%时,软化点相对于对照组基质沥青略有降低,但是随着复合改性剂掺量的继续增加,软化点不断提高,复合改性剂掺量约为15%时提高至对照组基质沥青水平,且掺量越多,软化点提高速率越快.复合改性剂掺量为10%、20%、30%、40%、50%和60%时改性沥青的软化点分别是对照组基质沥青98%、100.6%、102%、110%、126%和150%.表明复合改性剂掺量约为15%时复合改性沥青的高温性能与对照组基质沥青基本保持不变,随着复合改性剂掺量继续增加,沥青的高温性能逐渐得到提高,且掺量越多,提高越显著.

### 3.3 延度试验结果

低温条件下沥青路面的开裂形式一般表现为:沥青混合料中的沥青膜首先被拉伸破坏,然后整个沥青混合料产生开裂破坏,因此沥青低温条件下的变形能力在一定程度上反映了沥青混合料的低温抗裂性能<sup>[2]</sup>.本次试验采用延度指标对生物沥青及岩沥青复合改性沥青的低温性能进行研究.本研究中,对复合改性沥青进行了15℃的延度试验.其中零掺量试样采用与改性沥青同样的制备工艺后,在15℃时延度值为93.8cm,与未经过加工工艺的原样基质沥青相比,延度有一定程度的降低.生物沥青及岩沥青复合改性沥青的延度随复合改性剂掺量的变化如图4所示.

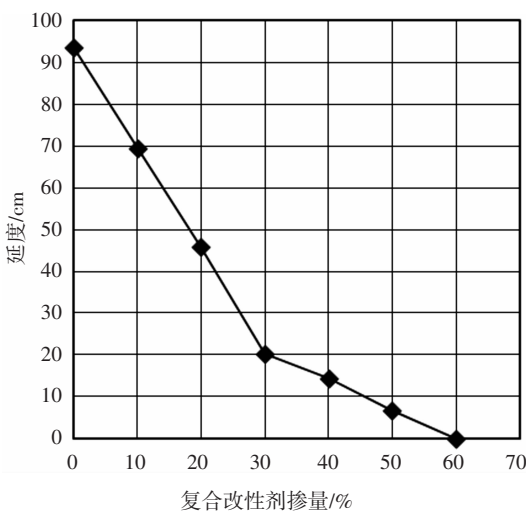


图4 延度随复合改性剂掺量的变化

Fig.4 The change of ductility with the content of composite modifier

图4显示,沥青的延度随着复合改性剂掺量的

增加而大幅下降,表明沥青的延展性降低.然而,本研究中造成沥青延度大幅下降的原因,可能是由于复合改性剂的物理组成所致,复合改性剂中含有大量矿物质颗粒,当沥青受到拉伸时,矿物质颗粒在沥青内部产生应力集中现象,造成沥青局部拉裂.因此采用延度变化来评价生物沥青及岩沥青复合改性沥青的低温性能还有待进一步研究,需从沥青混合料等方面对低温性能进行综合评价,下面采用沥青混合料弯曲试验对沥青的低温性能进行深入研究<sup>[13]</sup>.

### 3.4 混合料弯曲试验结果

为了综合评价复合改性剂对基质石油沥青低温性能的影响,采用沥青混合料弯曲试验进行验证.沥青混合料级配为AC-20C,评价指标为试件在-10℃条件下破坏时最大弯拉应变( $\epsilon_B$ ).一般认为,最大弯拉应变越大,越不容易开裂,其低温性能越好.对复合改性剂掺量为0%、15%、30%、45%、60%的改性沥青混合料分别进行小梁低温弯曲试验,最大弯拉应变随复合改性剂掺量的变化如图5所示.

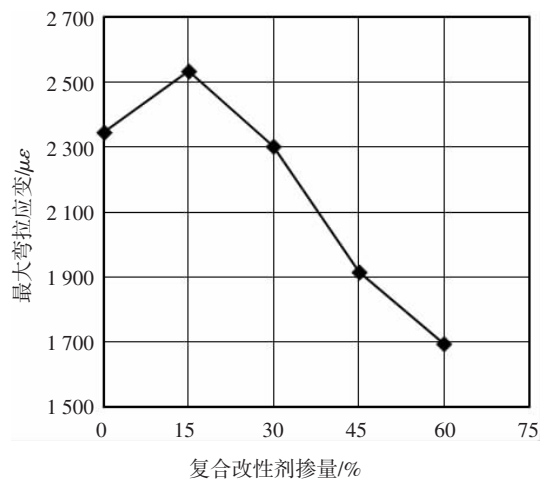


图5 最大弯拉应变随复合改性剂掺量的变化

Fig.5 The change of maximum flexural strain with the content of composite modifier

图5显示,当复合改性剂掺量为15%时,复合改性沥青混合料的弯拉应变相对于对照组基质沥青有所提高,然而随着复合改性剂掺量的继续增加,混合料的弯拉应变逐渐降低.掺量为15%、30%、45%和60%的沥青混合料破坏弯拉应变分别为2535 $\mu\epsilon$ 、2303 $\mu\epsilon$ 、1915 $\mu\epsilon$ 和1696 $\mu\epsilon$ ,分别是对照组基质沥青的108%、98%、81.6%和72.2%.表明复

合改性剂掺量不超过 30%时,不会对沥青的低温性能产生不利影响,甚至有一定改善。

### 3.5 黏度试验结果

沥青的黏度用来表现沥青的黏滞性,体现了沥青材料在外力作用下抵抗剪切变形的能力。沥青结合料及沥青混合料的高温性能与沥青的黏度有较好的相关性,故沥青的黏度可用来估计沥青混合料的高温抗车辙能力,沥青黏度越大,在外力作用下产生的剪切变形越小,弹性恢复性能越好,残留的永久变形越小,抗车辙能力越强<sup>[4-15]</sup>。另外,依据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)和 Superpave 沥青结合料规范,为满足施工和易性的要求,改性沥青在温度为 135℃时黏度不能超过 3 Pa·s。生物沥青及岩沥青复合改性沥青的黏度随复合改性剂掺量的变化如图 6 所示。

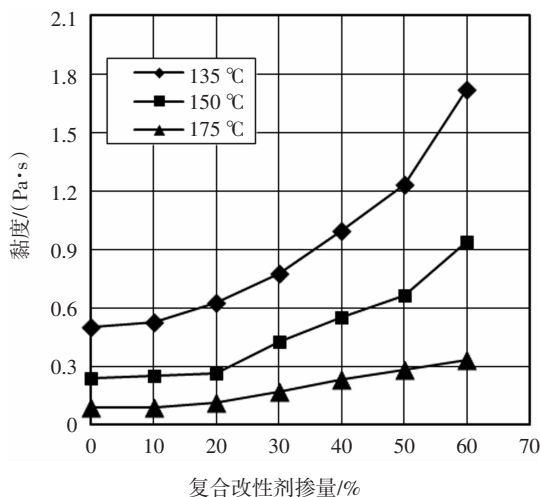


图 6 黏度随复合改性剂掺量的变化

Fig.6 The change of viscosity with the content of composite modifier

图 6 显示,在同一温度下,随着复合改性剂掺量的增加,生物沥青及岩沥青复合改性沥青的黏度呈增大的趋势,掺量为 20%~60%时增速明显加快。以 135℃黏度为例,复合改性剂掺量为 20%、30%、40%、50%和 60%的改性沥青,其黏度分别比基质沥青提高了 24%、54%、98%、144%和 242%。表明复合改性剂的掺入提高了沥青在高温条件下抵抗剪切变形的能力,且掺量越多,提高越显著。另外,复合改性沥青的 135℃黏度值均不大于 3 Pa·s,满足我国现行技术规范和 Superpave 沥青结合料规范的要求。

### 3.6 老化试验结果

RTFO 老化试验是一种模拟沥青材料短期老化的方式,通常利用沥青老化后的质量损失、软化点增量及残留针入度比等指标来评价沥青抗老化性能。本试验通过研究复合改性沥青与对照组基质沥青老化后的质量损失、软化点增量及残留针入度比来分析复合改性剂的掺入对基质沥青抗老化性能的影响。

图 7 所示为 RTFO 短期老化后复合改性沥青的质量变化。图 7 显示,沥青的质量损失随复合改性剂掺量增多而增大,但均满足规范 JTG F40—2004 的技术要求。然而,这是由于复合改性剂的物理组成中含有大量的挥发性物质和矿物质成分,造成了绝大部分的质量损失。因此沥青的质量损失随着复合改性剂掺量的增加而增大并不能说明沥青的抗老化性能降低。

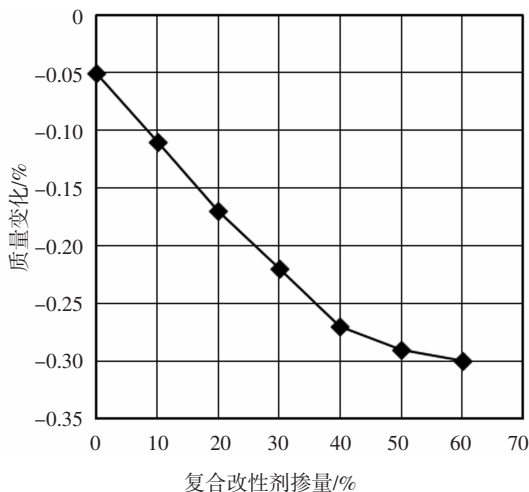


图 7 RTFO 试验后的质量变化率

随复合改性剂掺量的变化

Fig.7 The change of mass change rate after RTFO test with the content of composite modifier

复合改性沥青 RTFO 短期老化后的软化点变化见图 8。图 8 显示,复合改性沥青结合料短期老化后软化点变化均随复合改性剂的掺量增加而提高。当复合改性剂的掺量从 0 增加到 60%时,软化点变化从 4.7℃提高到 18.6℃,提升了 13.9℃,软化点变化提升明显。在软化点变化提升这方面,短期老化对生物沥青及岩沥青复合改性沥青结合料产生有利影响,沥青的高温稳定性得到提高。

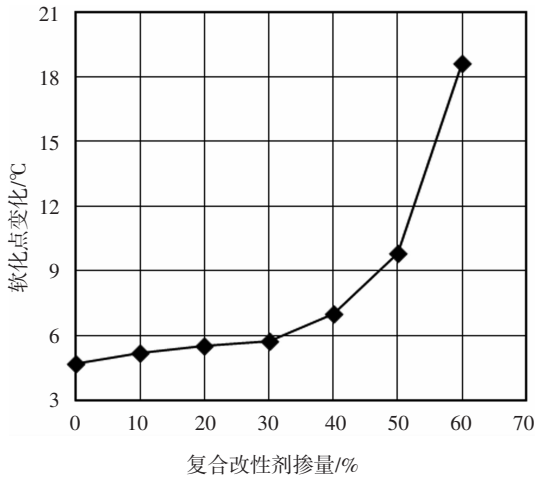


图8 生物沥青及岩沥青复合改性沥青  
RTFO 老化后的软化点变化

Fig.8 Change of softening point of bio-asphalt and  
rock-bitumen composite modified asphalt after RTFO aging

图9所示为复合改性沥青25℃残留针入度比。图9显示,随着复合改性剂的掺入,沥青的残留针入度比先略有减小后不断增大,复合改性剂掺量约为20%时达到对照组基质沥青水平,当复合改性剂掺量超过40%时,残留针入度比的增大速率加快。表明复合改性剂掺入超过20%时,复合改性沥青的抗老化能力从对照组基质沥青的水平随着复合改性剂掺量增加一直提高,且掺量越多,抗老化能力提高越显著。

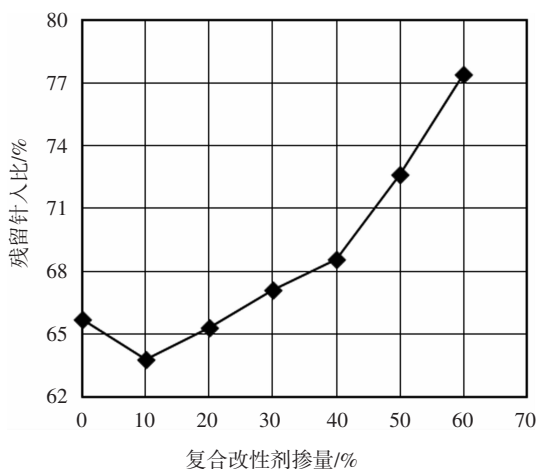


图9 25℃时的残留针入度比随复合改性剂掺量的变化

Fig.9 The change of residual penetration ratio with  
the content of composite modifier at 25℃

## 4 结论

本次试验研究通过沥青针入度试验、软化点试验、延度试验、黏度试验和RTFO老化试验,评价了生物沥青及岩沥青复合改性沥青的温度敏感性、高温性能、低温性能及抗老化性能,并采用混合料弯曲试验验证低温性能。试验结果与分析显示:

1) 在保持复合改性沥青与对照组基质沥青的25℃针入度一致时,岩沥青与生物沥青掺配比例的比值与复合改性剂掺量变化具有 $y = 0.0104x$ 的正比例关系,因此试验条件的保持具有通用性。

2) 随着复合改性剂掺量的增加,针入度指数PI值和黏度均不断增大,且掺量越多,增量越显著。表明复合改性剂的掺入可显著改善沥青的温度敏感性和增强抵抗变形能力。

3) 复合改性剂掺量超过15%时,复合改性沥青的高温性能从对照组基质沥青水平随着掺量的增加一直得到提高,且掺量越多,提高越显著。

4) 延度随着复合改性剂的掺入而大幅降低,但采用沥青混合料弯曲试验验证显示,复合改性剂掺量不超过30%时,复合改性剂的掺入不会对沥青的低温性能产生不利影响,甚至有一定改善。

5) 复合改性剂掺量超过20%时,复合改性沥青的抗老化能力从对照组基质沥青水平随着掺量的增加一直得到提高,且当掺量超过40%时,提高更为显著。

6) 复合改性剂掺量在20%~30%的范围内,复合改性剂的掺入提高了沥青的高温性能和抗老化能力,改善了温度敏感性,同时对沥青的低温性能有一定改善,且适应不同性能要求时掺量范围上限或下限可适当放宽。

## 参考文献

- [1] 潘浩志. 生物沥青改性沥青结合料使用性能研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2016:1—3.  
PAN H Z. Evaluating performance of bio-asphalt modified asphalt binder [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2016:1—3. (In Chinese)
- [2] 曾梦澜, 田伟, 朱艳贵, 等. 蓖麻油生物调和沥青混合料使用性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(11):177—

182.  
ZENG M L, TIAN W, ZHU Y G, *et al.* Study on performance of castor oil-based bioasphalt blended asphalt mixture [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44 (11):177—182. (In Chinese)
- [3] 汪海年, 高俊锋, 赵欣, 等. 基于 DSR 和 RV 的生物沥青结合料流变特性研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(6): 26—33.  
WANG H N, GAO J F, ZHAO X, *et al.* Rheological properties on bio-binder based on DSR and RV [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(6):26—33. (In Chinese)
- [4] 曾梦澜, 潘浩志, 田振, 等. 老化对生物沥青改性沥青结合料使用性能的影响[J]. 公路工程, 2016, 41(2):28—32.  
ZENG M L, PAN H Z, TIAN Z, *et al.* Aging effects on performance of asphalt binder modified with bio-asphalt [J]. Highway Engineering, 2016, 41(2):28—32. (In Chinese)
- [5] 曾梦澜, 赵宇, 潘浩志, 等. 欧洲岩沥青改性沥青结合料使用性能试验研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(5): 125—130.  
ZENG M L, ZHAO Y, PAN H Z, *et al.* An experimental study on performance of European rock asphalt modified asphalt binder [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(5):125—130. (In Chinese)
- [6] JTG F40—2004 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 8—31.  
JTG F40—2004 Technical specifications for construction of highway asphalt pavements [S]. Beijing: China Communications Press, 2004:8—31. (In Chinese)
- [7] JT/T 860.5—2014 沥青混合料改性添加剂第 5 部分: 天然沥青 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2014: 1—2.  
JT/T 860.5—2014 Modifier for asphalt mixture - part 5: natural asphalt [S]. Beijing: China Communications Press, 2014:1—2. (In Chinese)
- [8] 陈俊, 黄晓明. 沥青黏度和稠度本质及其关系研究[J]. 石油沥青, 2007, 21(4):40—44.  
CHEN J, HUANG X M. Study on hypostasis and relationship of asphalt viscosity and consistency [J]. Petroleum Asphalt, 2007, 21(4):40—44. (In Chinese)
- [9] JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011: 186—301.  
JTG E20—2011 Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 2011:186—301. (In Chinese)
- [10] 沈金安, 李福善. 评价沥青质量的核心指标——沥青感温性[J]. 石油沥青, 1997, 11(2):12—22.  
SHEN J A, LI F P. The nucleus quota of asphalt quality: asphalt temperature susceptibility [J]. Petroleum Asphalt, 1997, 11 (2): 12—22. (In Chinese)
- [11] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001: 80—102.  
SHEN J A. Performance of asphalt and asphalt mixture [M]. Beijing: China Communications Press, 2001: 80—102.
- [12] 张肖宁. 沥青与沥青混合料的黏弹性力学原理及应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006: 188—196.  
ZHANG X N. Viscoelastic mechanical principle and application of asphalt and asphalt mixture [J]. Beijing: China Communications Press, 2006: 188—196.
- [13] YILMAZ M, CELOGLU M E. Effects of SBS and different natural asphalts on the properties of bituminous binders and mixtures [J]. Construction and Building Materials, 2013, 44(3):533—540.
- [14] AMERI M, MANSOURIAN A, ASHANI S S, *et al.* Technical study on the Iranian Gilsonite as an additive for modification of asphalt binders used in pavement construction [J]. Construction and Building Materials, 2010, 25(3):1379—1387.
- [15] KOK B V, YILMAZ M, GULER M. Evaluation of high temperature performance of SBS+Gilsonite modified binder [J]. Fuel, 2011, 90(10):3093—3099.