

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2025.02.011

引用格式:王超,方凯,钟鑫阳,等.高黏高弹改性沥青的高低温流变性能研究[J].公路与汽运,2025,41(2):51-56.

Citation:WANG Chao,FANG Kai,ZHONG Xinyang,et al.Study on rheological properties of high viscosity and high elasticity modified asphalt at high temperature and low temperature[J].Highways & Automotive Applications,2025,41(2):51-56.

高黏高弹改性沥青的高低温流变性能研究^{*}

王超¹,方凯¹,钟鑫阳²,利璐³,肖钰臻⁴

(1.四川省交通建设集团有限责任公司,四川 成都 610047;2.成都理工大学,四川 成都 610059;

3.四川省交通勘察设计研究院有限公司,四川 成都 610041;4.长安大学公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:为研究高黏高弹改性沥青的高低温流变性能,通过动态剪切流变试验及多应力蠕变恢复试验及低温弯曲蠕变劲度试验对比分析老化前后 SBS 改性沥青与高黏高弹改性沥青的流变性能。结果表明,老化前后高黏高弹改性沥青比 SBS 改性沥青具有更好的高低温性能,82℃时高黏高弹改性沥青的车辙因子为 SBS 改性沥青的 4.9 倍,3.2 kPa 应力水平下应变恢复率和不可恢复蠕变柔量分别为 SBS 改性沥青的 2.3 倍、20%;-24℃时高黏高弹改性沥青的劲度模量和蠕变速率分别为 SBS 改性沥青的 50%、1.3 倍;经过短期老化后,改性沥青的高温抗变形能力提高,低温抗裂能力降低。

关键词:公路;高黏高弹改性沥青;SBS 改性沥青;流变性能;高低温性能;抗变形能力

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2025)02-0051-06

随着全球气候的变化,各地极端气候频发,如极端高低温天气、强降雨、冻雨等,对道路沥青材料提出了更高的耐候性要求。高黏高弹改性沥青具有高黏度、高弹性的特性,具有优异的黏结力和弹性恢复能力,可改善沥青路面的高温抗车辙、低温抗开裂及抗疲劳能力,广泛应用于多孔沥青混合料、应力吸收层、桥面铺装层^[1-2]。

目前主要针对高黏高弹改性沥青的流变性能进行试验研究,如张争奇等采用低温弯曲蠕变劲度试验研究 SBS、PU、SBS-PU、TPS、SINOTPS 高黏改性沥青的低温流变性能,发现以不同指标评价时得到的沥青低温性能优劣排序不同,总体上 SBS-PU 的低温流变性能最好^[3];李梦怡、Ghuzlan K. A. 等研究发现高黏改性剂可显著改善沥青的高温性能,但会降低沥青的低温流变性能^[4-5];Chen L. 等采用动态剪切流变仪及多应力蠕变恢复试验评价了含纤维高黏沥青的高温流变性能^[6];Chen J.C. 等采用热塑性聚氨酯(TPU)和丁苯橡胶(SBR)对基质沥青进行复合改性,并采用旋转黏度试验与弯曲蠕变劲度试验评价改性沥青的高低温流变性能,发现 TPU 的加入能改善 SBR 改性沥青在高温下抵抗荷载的

能力,改性后沥青具有优秀的低温抗开裂能力^[7];FU Z. 等通过分子动力学模拟与动态剪切流变试验研究不同掺量聚磷酸改性沥青的高温流变性能,发现分子量增大会阻碍沥青分子的扩散和移动,提高沥青的复数模量和沥青混合料的抗车辙能力^[8];刘培荣采用玄武岩、凝灰岩、花岗岩与 AC-13、SMA-13、改进型 OGFC-10、TYPE-B、OGFC-10 组成 15 种高黏弹改性沥青混合料,通过车辙试验评价其高温稳定性,分析了集料和级配类型对高黏弹改性沥青混合料高温稳定性的影响^[9]。高黏改性沥青虽然能改善沥青的高温性能,但无法有效提高沥青的低温抗开裂能力。为提高改性沥青在宽温度域的使用性能,本文基于流变学黏弹理论,通过动态剪切流变试验、多应力蠕变恢复试验、低温弯曲蠕变劲度试验评价高黏高弹改性沥青与 SBS 改性沥青老化前后的流变性能变化,研究高黏高弹改性沥青在高低温下的流变性能。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

采用的 SBS 改性沥青为线性结构,其主要性能

^{*} 基金项目:四川省交通运输科技项目(2024-ZL-08)

指标见表 1。

表 1 SBS 改性沥青的主要性能指标

试验项目	规范要求 ^[10]	试验结果
针入度(25℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	≥40	45.5
软化点(环球法)/℃	≥75	80
延度(5 cm/min,5℃)/cm	≥20	36.5
质量变化/%	±1.0	-0.243
RTFOT 后 针入度比/%	≥65	72.1
延度(5℃)/cm	≥15	28

按照 GB/T 30516—2014《高黏高弹道路沥青》，高黏高弹沥青的 60℃动力黏度应大于 $2 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，弹性恢复(25℃)应大于 85%^[11]。采用的高黏高弹改性沥青为橡胶合成共混物，其制备流程见图 1，主要性能指标见表 2。

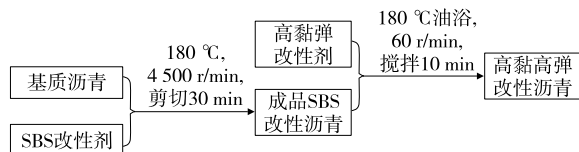


图 1 高黏高弹改性沥青的制备流程

表 2 高黏高弹改性沥青的主要性能指标

试验项目	技术指标	试验结果
针入度(25℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	40~80	48.6
软化点(环球法)/℃	≥70	90.1
延度(5 cm/min,5℃)/cm	≥20	46.8
弹性恢复(25℃)/%	≥85	98.2
动力黏度(60℃)/(10 ⁴ mm ² · s ⁻¹)	≥2	29.5
旋转黏度(135℃)/(Pa · s)	≤3	2.3
质量变化/%	±1.0	-0.124
RTFOT 后 针入度比/%	≥75	90.2
(163℃,5 h) 延度(5℃)/cm	≥25	42.1

1.2 试验方法

1.2.1 短期老化试验

采用旋转薄膜烘箱(RTFOT)对改性沥青进行短期老化,老化温度控制为 $163 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$,在该温度下受热时间为 75 min。将老化前高黏高弹改性沥青和 SBS 改性沥青分别记为高黏高弹-O、SBS-O,短期老化后分别记为高黏高弹-R、SBS-R。

1.2.2 温度扫描试验

采用 DHR-1 型动态剪切流变仪对短期老化前

后 2 种改性沥青试样进行动态剪切流变试验,测试 SBS 改性沥青和高黏高弹改性沥青的车辙因子 $G^* / \sin \delta$ (G^* 为复数剪切模量, δ 为相位角)。试验采用应变控制模式,温度为 $52 \sim 88 \text{ }^{\circ}\text{C}$,温度梯度为 $6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。选用直径为 25 mm 的平行板,间距为 1 mm,采用正弦波加载方式,振荡剪切频率为 10 rad/s 。以原样沥青 $G^* / \sin \delta \geq 1.0 \text{ kPa}$ 和 RTFOT 后沥青 $G^* / \sin \delta \geq 2.2 \text{ kPa}$ 作为高温分级标准,确定沥青的高温等级,表征沥青的高温抗车辙性能。

1.2.3 多重应力蠕变恢复试验

多重应力蠕变恢复试验采用 0.1 kPa、3.2 kPa 蠕变应力水平进行连续测试,先以 0.1 kPa 的应力循环加载 20 个周期,再以 3.2 kPa 的应力循环加载 10 个周期,每个周期分为 1 s 蠕变阶段和 9 s 卸载恢复阶段,总持续时间为 300 s。选择温度 $58 \sim 88 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为试验设置参数。应变恢复率和不可恢复蠕变柔量计算公式如下:

$$R = \frac{r_p - r_{nr}}{r_p - r_0} \quad (1)$$

$$J_{nr} = \frac{r_{nr} - r_0}{\tau} \quad (2)$$

式中: R 为一个蠕变-恢复周期的应变恢复率(%); r_p 为一个蠕变-恢复周期的峰值应变; r_{nr} 为每一蠕变-恢复周期的残留应变; r_0 为一个蠕变-恢复周期的初始应变; J_{nr} 为一个蠕变-恢复周期的不可恢复蠕变柔量(Pa^{-1}); τ 为施加的应力水平(Pa)。

1.2.4 弯曲蠕变劲度试验

弯曲蠕变劲度试验利用传统的弯曲梁蠕变原理评价沥青的低温性能^[12],试验温度为 $-12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-24 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2 试验结果与分析

2.1 高温流变性能

通过温度扫描试验和多重应力蠕变恢复试验分析 SBS 改性沥青和高黏高弹改性沥青的高温流变性能。

2.1.1 温度扫描

在不同温度下进行动态剪切流变试验,分析老化前后 2 种改性沥青复数剪切模量、相位角、车辙因子的变化,评价其流变行为。

2.1.1.1 复数剪切模量

不同温度下老化前后 2 种改性沥青的复数剪切模量见图 2。

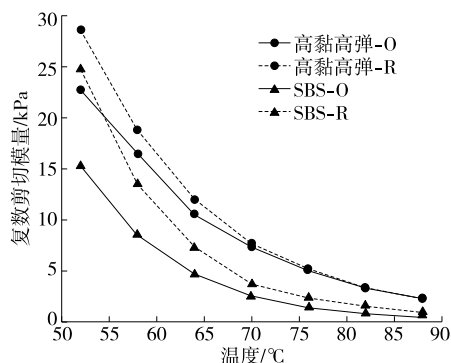


图 2 不同温度下老化前后 2 种改性沥青的复数剪切模量

由图 2 可知:1) 沥青的复数剪切模量随温度升高呈下降趋势,52~70 °C 时复数剪切模量下降速率最快,下降幅度达 70%~85%,70~88 °C 时下降速率减缓。这是由于温度较高时,沥青的黏性比例大,处于黏性状态,复数剪切模量下降速率较小。2) 相同温度下,老化后 2 种改性沥青的复数剪切模量均比老化前高,52 °C 时,老化后高黏高弹改性沥青的复数剪切模量最高达 28.6 kPa,比老化前提高 26.0%。随着温度的升高,老化前后 2 种改性沥青的复数剪切模量差值逐渐减小,温度超过 80 °C 时几乎无差异。这是由于温度升高使沥青变软,沥青中弹性比例减少,黏性比例增加,导致沥青的复数剪切模量降低^[13]。而老化后沥青的轻质组分减少,沥青质增加,导致沥青变硬,在高温下的流动性能变差,拥有更高的复数剪切模量。3) 相同温度下,老化前沥青中,高黏高弹改性沥青的复数剪切模量大于 SBS 改性沥青,52 °C 时 SBS 改性沥青的复数剪切模量仅为高黏高弹改性沥青的 67.5%。随着温度的升高,复数剪切模量减小,88 °C 时高黏高弹与 SBS 改性沥青的复数剪切模量分别为 52 °C 时的 11.9%、3.2%。说明高温下 SBS 改性沥青抵抗外力的能力比高黏高弹改性沥青差,且其受温度影响较大,感温性能较差。

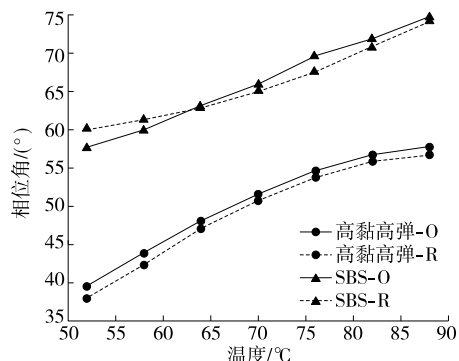
2.1.1.2 相位角

相位角 δ 能表征沥青的黏性比例和弹性比例,计算公式如下:

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (3)$$

式中: G'' 为损耗模量,表示材料在应力作用下耗散的能量,即材料的黏性部分(kPa); G' 为储能模量,表示材料在应力作用下储存的能量,即材料的弹性部分(kPa)。

相位角越大,沥青的黏性比例大、弹性比例小,抵抗外部剪切荷载的能力越差^[14]。图 3 为不同温度下老化前后 2 种改性沥青的相位角。

图 3 不同温度下老化前后 2 种改性沥青的相位角 δ

由图 3 可知:老化前后 2 种改性沥青的相位角随温度上升呈增大趋势,这是因为温度升高导致沥青软化,黏性成分增多。温度达到 88 °C 时,老化前 SBS 改性沥青的相位角达到最大值 75°,沥青体系中黏性部分为弹性部分的 3.7 倍,SBS 改性沥青表现为黏性特征,抵抗外部荷载的能力最差。随着温度的增高,高黏高弹改性沥青相位角的变化逐渐变缓,表明其对温度的敏感性较低,更适合应用于温差较大的环境。相同温度下,老化作用使高黏高弹改性沥青的相位角略微降低,沥青变硬,在一定程度上有利于沥青抵抗高温下剪切作用。

2.1.1.3 车辙因子

美国公路战略研究计划(SHRP)推荐采用车辙因子评价沥青的高温性能。高温条件下,沥青的车辙因子越大,其高温流动性能越差,抗车辙变形的能力越强^[15]。图 4 为不同温度下老化前后 2 种改性沥青的车辙因子。

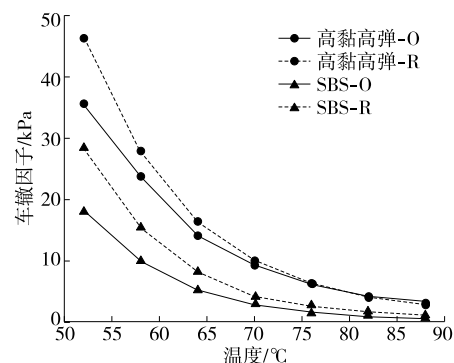


图 4 不同温度下老化前后 2 种改性沥青的车辙因子

由图 4 可知:老化前后 2 种改性沥青的车辙因子均随温度升高而下降,表明沥青在高温环境下逐

渐从黏弹体状态过渡为黏性体状态,在外界荷载作用下容易产生变形,高温环境下的稳定性降低。相同温度下,相较于 SBS 改性沥青,老化前后高黏高弹改性沥青均具有较高的车辙因子,如 88 °C 时老化前高黏高弹改性沥青的车辙因子比 SBS 改性沥青提高 6.2 倍,与 SBS 改性剂相比,高黏高弹改性剂的掺入能使沥青具有更高的高温抗车辙能力。52 °C 时老化前高黏高弹改性沥青的车辙因子为 35.69 kPa,老化后为 46.43 kPa,比老化前提高 30.1%;温度升高至 72 °C 时,老化前后高黏高弹改

性沥青的车辙因子差异不大,且其值的变化趋于平缓。说明温度对车辙因子的影响具有边缘递减效应。

2.1.2 多重应力蠕变恢复试验

多重应力蠕变恢复试验由美国联邦公路局提出,用于评价沥青的高温性能,弥补车辙因子在改性沥青高温性能评价上的不足^[16-17]。图 5 为不同应力水平和温度下老化前后 2 种改性沥青的应变恢复率,图 6 为不同应力水平和温度下老化前后 2 种改性沥青的不可恢复蠕变柔量。

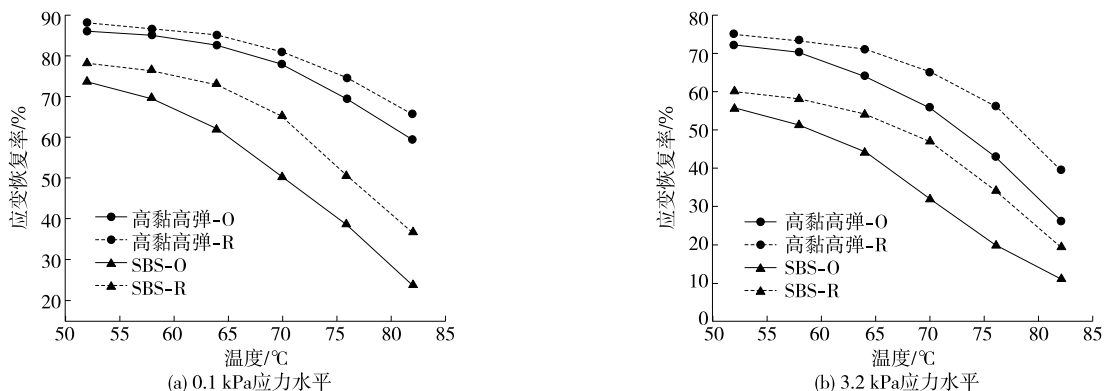


图 5 不同应力水平和温度下老化前后 2 种改性沥青的应变恢复率

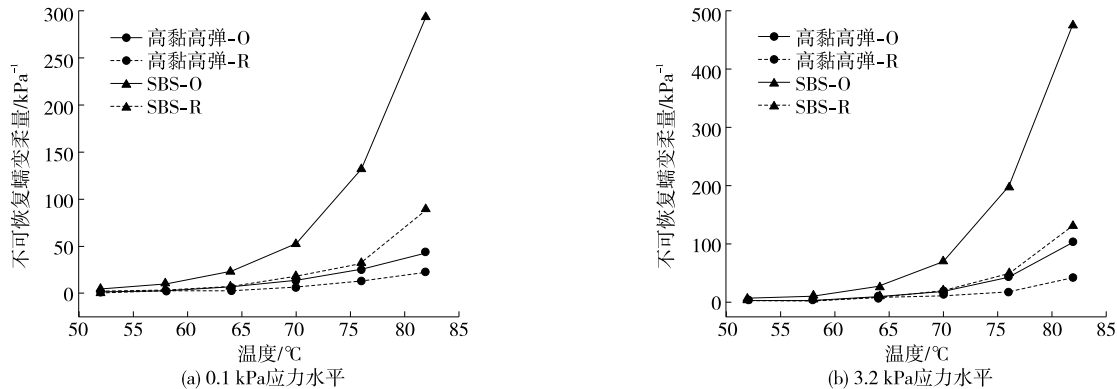
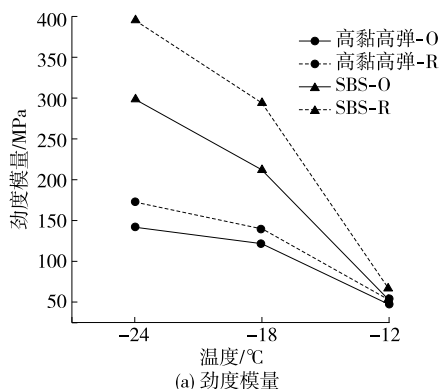


图 6 不同应力水平和温度下老化前后 2 种改性沥青的不可恢复蠕变柔量

由图 5 可知:1) 不同应力水平下,老化前后 2 种改性沥青的应变恢复率都随着温度的升高而下降,且老化后沥青的应变恢复率较大,高黏高弹改性沥青的应变恢复率比 SBS 改性沥青大。这是因为随着温度的升高,材料中分子能量不断增加,越来越多的分子能克服能量障碍,导致材料内部产生更多的自由体积,在外力作用下,分子之间更易发生滑移,导致黏性流动^[18]。0.1 kPa 应力水平下,52 °C 时老化前高黏高弹改性沥青的应变恢复率为 85.9%,温度升高至 82 °C 时应变恢复率为 59.3%,比 52 °C 时

降低 26.6 个百分点;52 °C 时老化前 SBS 改性沥青的应变恢复率为 73.7%,82 °C 时应变恢复率为 23.7%,比 52 °C 时降低 50.0 个百分点。老化后 2 种改性沥青存在相似的现象。2) 相同应力水平和温度下,高黏高弹改性沥青具有更好的应变恢复能力、更低的温度敏感性,更适用于抵抗高温下车辆荷载带来的剪切应力。另外,老化后改性沥青表现出与前文相同的特性,即老化后改性沥青具有更高的应变恢复能力,沥青的老化变硬过程有利于沥青抵抗高温变形。

不可恢复蠕变柔量为受外界荷载后沥青的不可恢复应变与所施加应力之比,可用于表征沥青的抗车辙性能,其值越小,表明沥青具有较高的恢复能力和较低的永久变形倾向^[19]。由图 6 可知:老化前后 2 种改性沥青的不可恢复蠕变柔量随着温度的升高而增加,相同温度下老化后沥青比老化前沥青拥有更低的不可恢复蠕变柔量。相同温度下,高黏高弹改性沥青的不可恢复蠕变柔量小于 SBS 改性沥青,且相同应力水平下,温度越高两者的差距越明显,0.1 kPa 应力水平下,82 ℃ 时老化前高黏高弹改性沥青的不可恢复蠕变柔量为 SBS 改性沥青的 14.7%,说明高黏高弹改性剂的掺入能有效提升沥青的可恢复变形能力。这是因为高黏高弹改性沥青



为橡胶共混改性沥青,与 SBS 相比增加了一定的弹性成分,使沥青胶浆单次变形损耗的能量降低,沥青更容易进行弹性恢复。

2.2 低温流变性能

弯曲劲度模量越大,沥青越脆,铺筑的沥青路面越容易出现裂缝。弯曲劲度模量随时间的变化率(蠕变速率 m)越高,路面在低温收缩时,沥青的弯曲劲度模量相当于降低,路面材料的拉应力减小,低温开裂风险降低^[20]。分别在 -12 ℃、-18 ℃、-24 ℃ 下进行低温弯曲蠕变劲度试验,分析不同温度下老化前后 2 种改性沥青的低温流变性能,试验结果见图 7。

由图 7 可知:1) 高黏高弹改性沥青和 SBS 改性

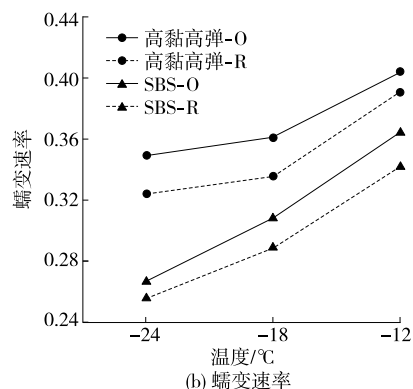


图 7 不同温度下老化前后 2 种改性沥青的低温弯曲蠕变劲度试验结果

沥青的劲度模量随着温度的降低而增加。老化前, -12 ~ -18 ℃ 时高黏高弹改性沥青的劲度模量增加 158.5%, SBS 改性沥青增加 294.8%; -18 ~ -24 ℃ 时高黏高弹改性沥青的劲度模量增加 16.4%, SBS 改性沥青增加 41.1%。相同温度变化梯度下,高黏高弹改性沥青劲度模量的变化幅度比 SBS 改性沥青小,高黏高弹改性沥青受低温变化的影响程度较小。相同温度下,高黏高弹改性沥青的劲度模量均小于 SBS 改性沥青,且温度越低两者的劲度模量相差越大, -24 ℃ 时达到最大(157.2 MPa),表明高黏高弹改性沥青的耐低温性能更强,低温脆化程度比 SBS 改性沥青轻。2) 根据美国 SHRP 计划,蠕变速率不得低于 0.3^[12,21]。 -24 ℃ 时高黏高弹改性沥青的蠕变速率为 0.349,高于限值 0.3,高黏高弹改性沥青的低温分级至少能达到 -22 ℃。各温度下高黏高弹改性沥青的蠕变速率均大于 SBS 改性沥青,说明高黏高弹改性沥青在低温下的应力松弛能力更强,具有更优异的抗裂能力。随着温度的降低,蠕变速率逐渐减小, -12 ~ -18 ℃ 时高黏

高弹改性沥青的蠕变速率减少 10.6%、SBS 改性沥青减少 15.6%, -18 ~ -24 ℃ 时高黏高弹改性沥青的蠕变速率减少 3.3%、SBS 改性沥青减少 13.3%,高黏高弹改性沥青的蠕变速率受温度变化的影响比 SBS 改性沥青小。3) 老化会提高改性沥青的劲度模量,降低其蠕变速率,从而降低沥青的低温抗裂能力,且温度愈低这种现象愈明显。对于高黏高弹改性沥青, -24 ℃ 时老化作用导致其劲度模量提高 22.0%、蠕变速率降低 7.2%,但老化后高黏高弹改性沥青的蠕变速率在试验温度范围内仍大于 0.3,满足 SHRP 的要求。对于 SBS 改性沥青, -24 ℃ 时老化前其蠕变速率仅为 0.267, -18 ℃ 时老化后其蠕变速率为 0.289,无法满足低温性能要求。

3 结论

(1) 与 SBS 改性沥青相比,高黏高弹改性沥青具有更好的高温抗变形能力,各试验温度下高黏高弹改性沥青均具有更高的复数剪切模量和车辙因子、更低的相位角,88 ℃ 时高黏高弹改性沥青的上述指标分

别为 SBS 改性沥青的 5.5 倍、6.2 倍、80%；高黏高弹改性沥青的高温抗永久变形能力高于 SBS 改性沥青，0.1 kPa、3.2 kPa 应力水平下，82℃ 时其应变恢复率分别为 SBS 改性沥青的 2.5 倍、2.3 倍，不可恢复蠕变柔量分别为 SBS 改性沥青的 14.7%、21.7%。同时高黏高弹改性沥青具有更低的温度敏感性，各项指标随温度的变化率均比 SBS 改性沥青小。

(2) 高黏高弹改性沥青具有更好的低温流变性能，-24℃ 时高黏高弹改性沥青的劲度模量为 142.0 MPa，为 SBS 改性沥青的 47.5%；蠕变速率达 0.349，高于 SHRP 规定值，为 SBS 改性沥青的 1.3 倍。高黏高弹改性沥青在低温范围内的温度敏感性比 SBS 改性沥青低，-12~-18℃ 时高黏高弹改性沥青劲度模量和蠕变速率的变化幅度分别为 158.5%、10.6%，SBS 改性沥青分别为 294.8%、15.6%。

(3) 老化能提高改性沥青的高温性能，但对低温性能不利，这可能是由于老化使沥青内部组分发生改变，沥青质比例增加，导致沥青变“硬”。52℃ 时老化后高黏高弹改性沥青的复数剪切模量最高，为 28.6 kPa，比老化前提高 26.0%；-24℃ 时老化作用使高黏高弹改性沥青的劲度模量提高 22.0%，蠕变速率降低 7.2%。但温度超过一定范围时，两者的差异逐渐减小。

参考文献：

- [1] WANG J N, XUE Z J, GUO M, et al. Using the rheological index to quantitatively evaluate the mechanical performance of high-elasticity modified asphalt [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, 2021(1): 6614644.
- [2] 龙翔, 许志东, 张新, 等. 高黏高弹改性乳化沥青性能评价及超黏磨耗层应用研究 [J]. *公路与汽运*, 2022(4): 54-57+62.
- [3] 张争奇, 张英楠, 黄硕磊. SBS-PU 复合改性沥青及其混合料路用性能研究 [J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(5): 76-84.
- [4] 李梦怡. 高黏改性剂对沥青流变性能的影响 [J]. *公路交通科技*, 2018, 35(4): 14-20.
- [5] GHUZLAN K A, AL ASSI M O. Sasobit-modified asphalt binder rheology [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(9): 04017142.
- [6] CHEN L, CHEN J Y, LI M L, et al. Research on high-temperature rheological performance of fiber reinforced high-viscosity asphalt mastics [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 397: 132397.
- [7] CHEN J C, LIU Y, RONG H L, et al. Research on high and low temperature rheological properties of TPU/SBR composite modified asphalt [J]. *Materials Research Express*, 2024, 11(2): 025301.
- [8] FU Z, TANG Y J, PENG C, et al. Properties of polymer modified asphalt by polyphosphoric acid through molecular dynamics simulation and experimental analysis [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2023, 382: 121999.
- [9] 刘培荣. 集料类型和级配类型对高粘弹改性沥青混合料高温稳定性的影响 [J]. *公路与汽运*, 2019(2): 60-61+76.
- [10] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [11] 中海油气开发利用公司. 高粘高弹道路沥青: GB/T 30516—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [12] Transportation Research Board. National cooperative highway research program. Strategic highway research program: Research plans [M]. Transportation Research Board, 1986.
- [13] 张含宇. 加速老化过程中沥青流变特性演化及其关键路用性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [14] 郁振清. 高寒高海拔地区的沥青面层抗裂技术研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [15] 史思强, 杨玉晶, 高林. 高弹改性沥青的流变性能响应 [J]. *公路交通科技*, 2013, 30(2): 14-18+54.
- [16] 田于锋. 高黏度改性沥青老化前后多尺度特性研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- [17] 奚晨晨, 严守靖, 魏金涛, 等. MSCR 试验对不同老化程度高黏沥青高温性能分析 [J]. *中国测试*, 2024, 50(4): 153-159.
- [18] YANG Z, ZHANG X N, YU J M, et al. Effects of aging on the multiscale properties of SBS-modified asphalt [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019, 44(5): 4349-4358.
- [19] 冯学茂, 白献萍, 韦慧, 等. 不同老化模式下有机化蒙脱土生物改性沥青性能 [J]. *中外公路*, 2022, 42(5): 198-202.
- [20] 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.
- [21] 冯蕾, 杨鑫, 常俊鹏. 温拌胶粉改性沥青砂浆在冻融作用下的低温性能研究 [J]. *中外公路*, 2023, 43(5): 188-193.

收稿日期: 2024-07-09