

SBS、橡胶和高黏改性沥青流变性能对比

袁东东¹, 蒋 玮^{1,2}, 肖晶晶³, 周 博¹, 贾 猛¹, 王文通¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;
3. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘 要:为充分认识在同一评价体系中不同改性沥青高低温流变性能,使用动态剪切流变仪对 SBS、橡胶和高黏改性沥青分别进行应变扫描试验,确定其线性黏弹性范围,进行频率扫描试验和多重应力蠕变恢复试验分析其高温性能。同时使用弯曲梁流变仪对 3 种改性沥青进行弯曲蠕变劲度试验分析其低温性能。研究表明:根据应变扫描试验结果,当应变小于 10% 时, SBS、橡胶和高黏改性沥青处在线性黏弹性范围内。根据频率扫描试验结果,使用 Sigmoidal 模型拟合 SBS、橡胶和高黏改性沥青的复数剪切模量主曲线光滑连续,且均是简单的流变材料; SBS、橡胶和高黏改性沥青在低频状态下复数剪切模量相差较大,在高频状态下复数剪切模量相差较小。根据多重应力蠕变恢复试验结果,相比 SBS 和高黏改性沥青,橡胶改性沥青具有较高的流动变形特性;高黏改性沥青的抗永久变形能力优于橡胶和 SBS 改性沥青。低温弯曲蠕变劲度试验中,蠕变劲度和蠕变速率均与温度呈指数关系。通过蠕变劲度和蠕变速率可知,高黏改性沥青的低温抗裂性优于 SBS 和橡胶改性沥青。此外,用蠕变劲度指数衡量改性沥青的低温感温性,可知高黏改性沥青温度敏感性低于 SBS 和橡胶改性沥青温度敏感性。因此,在流变性能方面,高黏改性沥青的高低温性能均优于 SBS 和橡胶改性沥青。

关键词:道路工程;改性沥青;流变学理论;高温性能;低温性能

中图分类号:U414 **文献标志码:**A **DOI:**10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.01.014

Comparison of rheological properties between SBS, rubber and high-viscosity modified asphalt binders

YUAN Dong-dong¹, JIANG Wei^{1,2}, XIAO Jing-jing³, ZHOU Bo¹,
JIA Meng¹, WANG Wen-tong¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
3. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: To fully understand the high- and low-temperature rheological properties of different modified asphalt binders in the same evaluation system, a dynamic shear rheometer was used to conduct a strain sweep test to determine the linear viscoelastic range of styrene-butadiene-styrene (SBS) modified asphalt binder, rubber modified asphalt binder, and high-viscosity modified

收稿日期:2019-10-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1600200);国家自然科学基金项目(51608043);

霍英东教育基金会高等院校青年教师基金项目(161072)

作者简介:袁东东(1991-),男,甘肃会宁人,工学博士研究生,E-mail:ddy@chd.edu.cn。

通讯作者:蒋 玮(1983-),男,安徽宣城人,教授,博士研究生导师,E-mail:jiangwei@chd.edu.cn。

asphalt binder. This rheometer was also utilized to perform the frequency sweep test and multiple stress creep recovery tests to analyze their high-temperature properties. Meanwhile, a bending beam rheometer was used to carry out bending creep stiffness tests to analyze their low-temperature properties. The results show that according to the strain sweep test, the SBS, rubber, and high-viscosity modified asphalt binders are within the range of linear viscoelasticity at less than 10% strains. Based on the frequency sweep test result, their complex shear modulus main curves fitted by the Sigmoidal model are smooth and continuous, they are all simple rheological materials. There are great differences in the complex shear moduli of the SBS, rubber, and high viscosity modified asphalt binders at low frequencies. These differences are relatively small at high frequencies. The multiple stress creep recovery test result shows that compared with the SBS and high-viscosity modified asphalt binders, the rubber modified asphalt binder has larger flow deformation characteristics. Furthermore, the high-viscosity modified asphalt binder has better resistance to permanent deformation than rubber and SBS modified asphalt binders. According to the low-temperature bending creep stiffness test result, both creep stiffness and creep rate are exponentially related to temperature. Through the creep stiffness and creep rate, it is determined that the low-temperature cracking resistance of the high-viscosity modified asphalt binder is better than that of SBS and rubber modified asphalt binders. Furthermore, the result of low-temperature sensitivity assessed by the creep stiffness index demonstrates that the temperature sensitivity of the high-viscosity modified asphalt binder is smaller than that of SBS and rubber modified asphalt binders. Therefore, the high- and low-temperature rheological behaviors of the high-viscosity modified asphalt binder are superior to those of the SBS and rubber modified asphalt binders. 3 tabs, 10 figs, 29 refs.

Key words: road engineering; modified asphalt; rheological theory; high-temperature performance; low-temperature performance

0 引言

多孔沥青混合料是一种空隙率为 15%~25% 的多孔路面材料^[1]。与传统的密实路面材料相比,集料和集料之间由全面积接触变成点接触状态^[2],从而导致集料间黏结接触面积减少,为了保证混合料的强度、稳定性与耐久性,对混合材料组成设计提出更高的要求。在结合料的选用上,一般采用改性沥青,但由于应用环境的不同,在选用改性沥青时也存在较大差异。美国和欧洲多采用 SBS 改性沥青或橡胶改性沥青^[3-4],在亚洲,如中国、日本、新加坡等多采用高黏改性沥青(黏度大于 20 000 Pa·s)^[5-6]。其中,SBS、橡胶改性沥青具有良好的路用性能,是目前使用最广泛的改性沥青材料,同时橡胶的应用还能够一定程度上缓解环境污染问题^[7];高黏改性沥青具有高黏、高弹的特性,因其优异的黏结力和弹性恢复能力而广泛应用于多孔沥青混合料、应力吸收层、桥面铺装层等材料中。

改性沥青是典型的黏弹性材料,采用流变学黏

弹理论研究改性沥青的相关性能,是目前研究的主要方向^[8]。在以往的研究中,有关学者对改性沥青的流变性能进行了一定的研究。对于 SBS 改性沥青,黄卫东等采用动态剪切流变仪(DSR)时间扫描试验和多应力蠕变恢复试验,研究了不同掺量下线形、星形 SBS 改性沥青的高温性能,结果表明当 SBS 掺量较低时,改性剂的掺量对改性沥青高温性能具有显著影响^[9]。董文龙等采用低温小梁弯曲试验对不同老化状态下的 SBS 改性沥青进行低温性能分析,结果表明脂肪长链指数与 SBS 改性沥青的低温性能密切相关,脂肪长链指数越小,低温性能越好^[10]。Laukkanen 等研究了 SBS 改性沥青的低温流变性,建立了弯曲梁流变仪(BBR)测得的蠕变劲度与 4 mm DSR 测得的复数剪切模量的线性关系^[11]。张恒龙等探究了长期老化对 SBS 改性沥青流变性能的影响,结果表明老化后 SBS 改性沥青的复数模量变大,不同老化过程相位角变化较小^[12]。对于橡胶改性沥青,李波等采用 DSR 研究了废旧胶粉掺量、粒径、制备工艺等对橡胶沥青高温性能的影响

响,结果表明废旧胶粉与基质沥青的反应决定了橡胶沥青的高温性能^[13]。Jeong 等采用 DSR 研究了剪切时间、剪切温度、胶粉掺量对橡胶沥青性能的影响,结果表明胶粉掺量对橡胶沥青的复数模量具有显著影响^[14]。郭贺源等采用 DSR 研究了石墨烯对橡胶沥青流变性能的影响,结果表明添加石墨烯可以提高橡胶沥青的抗变形能力和抗车辙性能^[15]。谭忆秋等采用 BBR 试验研究了橡胶沥青的低温评价指标,结果表明采用单一的指标评价橡胶沥青的低温性能存在一定的局限性,推荐采用综合考虑模量和应力松弛能力的指标作为橡胶沥青低温性能的评价指标^[16]。马峰等采用 BBR 研究了氢化苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物(SEBS)改性剂对橡胶沥青低温性能的影响,结果表明 SEBS 改性剂可以显著降低沥青蠕变劲度,改善橡胶沥青的低温性能^[17]。对于高黏改性沥青,张争奇等采用 DSR 研究了 SBS-PU、SINOTPS、TPS 三种高黏改性沥青的高温流变性和储存稳定性,结果表明 SBS-PU 复合改性高黏沥青具有较好的高温抗变形能力和变形恢复能力^[18]。李梦怡研究了高黏改性剂掺量对沥青流变性能的影响,结果表明掺加高黏改性剂可显著改善沥青的高温性能,但也降低了沥青的低温流变性^[19]。马翔等采用 BBR 研究了-12℃温度条件下高黏沥青和 SBS 改性沥青老化前后的低温性能,结果表明蠕变劲度和蠕变速率没有很好的一致性,不能同时评价沥青低温性能^[20]。Zhang 等采用 BBR 研究了增塑剂和交联剂对高黏改性沥青低温流变性的影响,结果表明增塑剂可以提高沥青的蠕变劲度,而交联剂则降低了沥青的蠕变劲度^[21]。

综上,目前研究大多单独对 SBS、橡胶、高黏改性沥青进行研究,缺乏在同一评价体系中进行对比研究。为此,本研究选取 3 种不同的改性沥青(包括 SBS、橡胶和高黏改性沥青)作为研究对象,基于流变学黏弹理论,采用动态剪切流变试验和弯曲蠕变劲度试验在同一评价体系下系统对比分析 3 种改性沥青的高低温流变性能,从而为多孔沥青路面、应力吸收层、桥面铺装层等沥青结合料的比选提供技术依据。

1 原材料与试验方法

1.1 沥青原材料

3 种改性沥青的主要技术性能见表 1,其测试方法与技术要求参见《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)。其中 SBS 改性沥青由西安国琳实业股份有限公司提供,橡胶改性沥青由

山东安捷路桥工程有限公司生产,高黏改性沥青由深圳市格瑞实业发展有限公司提供。

表 1 改性沥青的性能指标
Tab. 1 Performance indicators of modified asphalt

改性沥青	针入度(25℃, 100 g,5 s)/ 0.1mm	软化点 (环球法)/ ℃	延度(5℃, 5 cm·min ⁻¹)/ cm	动力黏度 (60℃)/ (Pa·s)
SBS 改性 沥青	64.0	94.2	45.7	14 169.2
橡胶改性 沥青	51.1	63.2	13.3	3 177.7
高黏改性 沥青	49.3	94.2	48.6	99 635.4

1.2 试验方法^[22-23]

(1)应变扫描试验。目前改性沥青黏弹特性的研究多基于线性黏弹性理论,当改性沥青所受荷载较小时,材料力学响应符合线性黏弹性理论研究范围;当改性沥青所受荷载较大时,材料力学响应呈非线性特征^[24]。应变扫描试验可以确定改性沥青的线性黏弹性范围。本文选择温度 30℃,角频率 10 rad/s 作为应变扫描试验设置参数。

(2)频率扫描试验。频率扫描试验是研究改性沥青黏弹特性的主要试验方法测定^[25]。本文选择频率 ω 为 0.1~100 rad/s,温度为 30℃、40℃、50℃、60℃、70℃作为频率扫描试验设置参数。

(3)多重应力蠕变恢复试验(multiple stress creep recovery,MSCR)。采用 0.1 和 3.2 kPa 两种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 的蠕变阶段和 9 s 的卸载恢复阶段,总持续时间 300 s^[26]。参考 AASH-TO MP19-10 分级标准的要求^[27],本文选择温度 64℃和 70℃作为试验设置参数。

(4)弯曲蠕变劲度试验。根据美国公路战略研究计划(SHRP)评价沥青低温性能的方法,试验利用传统的弯曲梁蠕变原理。本文选择温度为-12℃、-18℃、-24℃作为试验设置参数。

试验(1)、(2)、(3)采用美国 TA Instruments 公司生产的 DHR-2 型动态剪切流变仪,如图 1 所示;试验(4)采用美国 Cannon 弯曲梁流变仪,如图 2 所示。

2 高温流变性能

采用应变扫描、频率扫描和 MSCR 试验结果分析 3 种改性沥青的高温流变性能。

2.1 应变扫描

美国 SHRP 计划认为,随着应变幅值增大,复

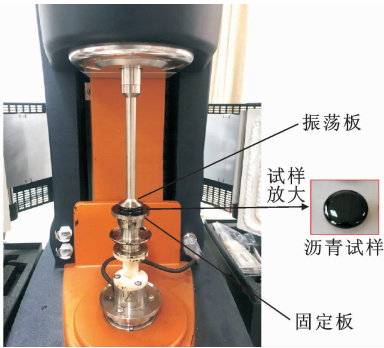


图 1 动态剪切流变试验

Fig. 1 Dynamic shear rheological test

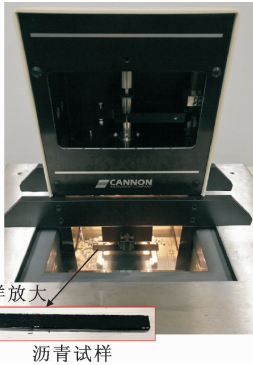


图 2 弯曲蠕变劲度试验

Fig. 2 Bending beam rheological test

数模量的降低值不超过最大复数模量的 10% 时,可认为该材料处于线性黏弹性范围^[28]。3 种改性沥青的应变扫描试验曲线如图 3 所示。由图 3 可以看出,3 种改性沥青在应变为 0.1%~10% 范围内的复数模量几乎不变,说明当应变小于 10% 时改性沥青处于线性黏弹性范围。因此,本研究动态剪切流变试验基于线性黏弹性理论,采用应变控制模式,应变为 1%。

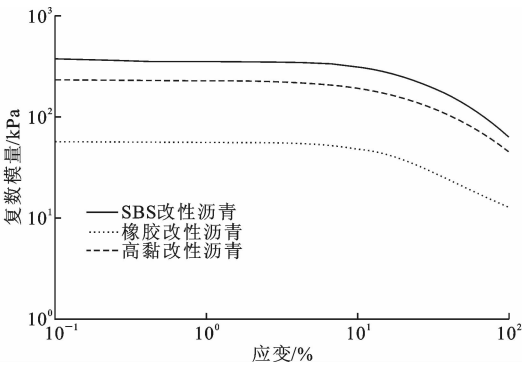


图 3 改性沥青应变扫描曲线

Fig. 3 Strain scanning curves of modified asphalt

2.2 频率扫描

沥青材料的力学行为受温度和频率的影响,并在高温低频和低温高频条件下具有等效的黏弹性性

质。采用时间-温度等效原理绘制主曲线可以将室内试验有限的温度和频率拓展至更宽的温度、频率范围内,从而可以更加全面地认识沥青材料的力学行为^[8]。时间-温度等效原理将不同温度下的试验数据平移至参考温度,得到换算加载频率 f' ,其与移位因子的关系如式(1)所示,移位因子通过 WLF (Williams-Landel-Ferry) 非线性方程确定,其表达式如式(2)所示,即

$$f' = a_T f \tag{1}$$

$$\lg a_T = \frac{-c_1(T-T_1)}{c_2+T-T_1} \tag{2}$$

式中: a_T 为移位因子; T 为试验温度; T_1 为参考温度; c_1 、 c_2 为经验常数; f 为试验频率。

本文以 60 °C 为参考温度,计算 3 种改性沥青的移位因子 a_T 见表 2。

表 2 改性沥青 WLF 方程移位因子

Tab. 2 Shift factors of WLF equation of modified asphalt

温度/°C	SBS 改性沥青	橡胶改性沥青	高黏改性沥青
30	2.278 535 558	2.210 866 385	2.458 986 685
40	1.404 988 052	1.349 622 365	1.495 213 616
50	0.633 969 597	0.601 160 301	0.633 969 597
60	0	0	0
70	-0.520 507 505	-0.577 923 772	-0.577 923 773

本文采用 Sigmoidal 模型拟合复数剪切模量主曲线,其表达式为

$$\lg |G^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\lg f')}} \tag{3}$$

式中: G^* 为复数剪切模量; δ 为剪切模量最小值; α 为剪切模量跨度值; β 、 γ 为形状参数。

通过 Origin 软件拟合 Sigmoidal 模型的 4 个参数 α 、 β 、 γ 、 δ ,使其计算的方差值达到最小。本研究以 60 °C 为参考温度,确定的拟合参数结果见表 3, R^2 为判定系数;改性沥青复数剪切模量主曲线如图 4 所示,图 4 中 ω 为角频率。

表 3 改性沥青的主曲线拟合参数

Tab. 3 Master curves fitting parameters of modified asphalt

参数	SBS 改性沥青	橡胶改性沥青	高黏改性沥青
α	3.737 16	4.102 34	3.289 62
β	1.409 51	0.963 45	1.638 56
γ	-0.874 38	-0.795 57	-0.880 66
δ	2.304 80	1.948 870	3.036 00
R^2	0.991 72	0.988 6	0.994 37

由图 4 可知,3 种改性沥青的复数剪切模量主曲线是光滑连续的,说明其均是简单的流变材料。3 种改性沥青的低频复数剪切模量相差较大,考虑低

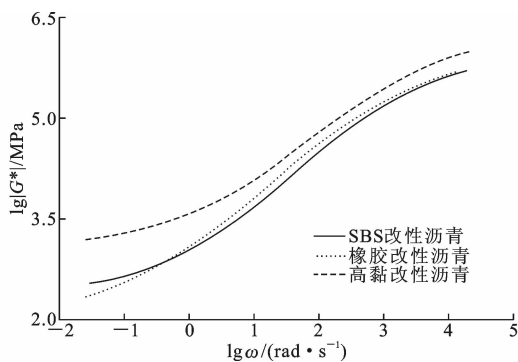


图 4 改性沥青的复数模量主曲线

Fig. 4 Complex modulus main curves of modified asphalt

频对应高温,低频复数剪切模量越大则高温抗变形能力越强。因此,3种改性沥青高温抗变形能力由强到弱依次为高黏改性沥青、SBS改性沥青、橡胶改性沥青。同理,高频复数剪切模量越大则低温变形能力越小,3种改性沥青的高频复数剪切模量相差不多,通过对比分析可知低温变形能力由大到小依次为 SBS 改性沥青、橡胶改性沥青、高黏改性沥青。

2.3 MSCR 试验

图 5 为 64 ℃ 温度条件下 3 种改性沥青的 MSCR 试验时间-应变关系曲线。由图 5 可以看出:高黏改性沥青和 SBS 改性沥青有明显的蠕变恢复阶段,而橡胶改性沥青的恢复曲线不明显,这表明高黏改性沥青和 SBS 改性沥青的蠕变恢复能力高于橡胶改性沥青;在 2 种应力条件(0.1、3.2 kPa)试验过程中,3 种改性沥青的应变由大到小依次为橡胶改性沥青、SBS 改性沥青、高黏改性沥青,表明橡胶改性沥青具有较高的沥青流动变形特性,这对沥青路面的高温抗车辙性能是不利的。

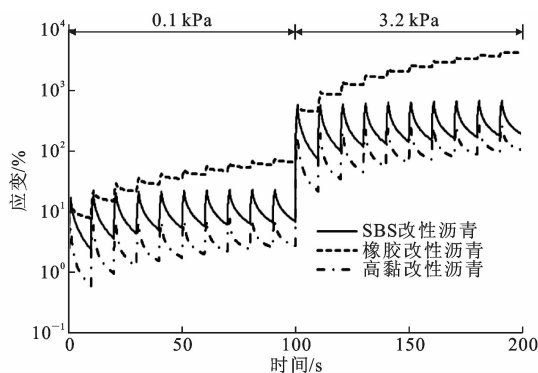


图 5 改性沥青的 MSCR 试验时间-应变关系(64 ℃)

Fig. 5 MSCR test time-strain relationships of modified asphalt (64 °C)

2.3.1 不可恢复蠕变柔量

沥青路面的高温车辙现象主要是由不可恢复应变的累积造成的,采用不可恢复蠕变柔量评价沥青

结合料的高温性能,其计算如下

$$J_{nr} = \frac{\epsilon_u}{\sigma} \quad (4)$$

式中: J_{nr} 为不可恢复蠕变柔量; ϵ_u 为未恢复的应变; σ 为加载应力。

本文用 J_{nr1} 和 J_{nr2} 分别表示改性沥青在 0.1、3.2 kPa 应力作用下的平均不可恢复蠕变柔量。3 种改性沥青在 64 ℃ 和 70 ℃ 时的 J_{nr1} 和 J_{nr2} 如图 6 所示。由图 6 可知:3.2 kPa 下沥青的 J_{nr2} 值高于 0.1 kPa 下沥青的 J_{nr1} 值,70 ℃ 下沥青的 J_{nr} 值高于 64 ℃ 下沥青的 J_{nr} 值,可见应力增大或者温度升高会使改性沥青的不可恢复蠕变柔量增大,导致改性沥青抗永久变形能力变差;在同一应力或温度条件下,3 种改性沥青的 J_{nr} 值由大到小依次为橡胶改性沥青、SBS 改性沥青、高黏改性沥青,说明高黏改性沥青具有较好的高温抗永久变形能力。

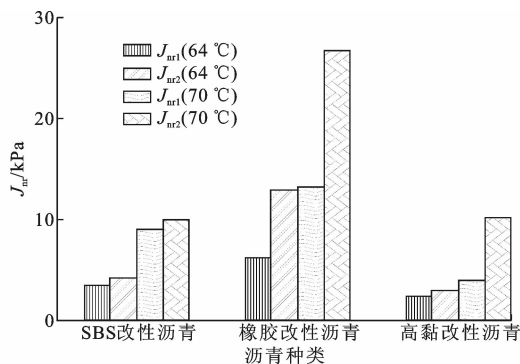


图 6 不同应力和温度下改性沥青的不可恢复蠕变柔量

Fig. 6 Unrecoverable creep compliance of modified asphalt at different stresses and temperatures

2.3.2 应力敏感性

采用 0.1、3.2 kPa 下的不可恢复蠕变柔量的相对差异来表示应力敏感性 $J_{nr-diff}$,按照式(5)计算,结果如图 7 所示。

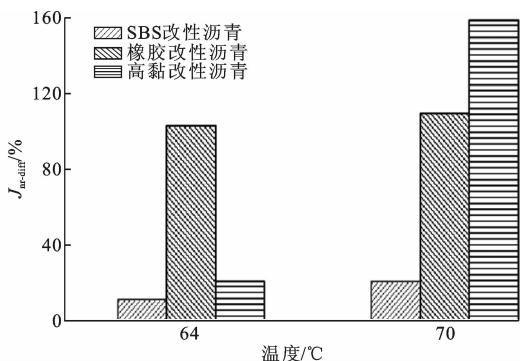


图 7 不同温度下改性沥青的应力敏感性

Fig. 7 Stress sensitivities of modified asphalt at different temperatures

$$J_{nr-diff} = [(J_{nr2} - J_{nr1}) / J_{nr1}] \times 100\% \quad (5)$$

由图 7 可以看出:当温度为 64 ℃时,SBS 改性沥青、橡胶改性沥青、高黏改性沥青的 $J_{nr-diff}$ 值分别为 11.1%、102.7%、20.3%;当温度条件为 70 ℃时,SBS 改性沥青、橡胶改性沥青、高黏改性沥青的 $J_{nr-diff}$ 值分别为 20.5%、109.1%、158.1%。温度升高,改性沥青的应力敏感性增大,说明温度越高,改性沥青的应力敏感性越突出。AASHTO MP19-10 中要求 $J_{nr-diff}$ 值不大于 75%,64 ℃、70 ℃下橡胶改性沥青的 $J_{nr-diff}$ 值和 70 ℃下高黏改性沥青的 $J_{nr-diff}$ 值均远大于 75%,这可能归因于改性沥青已经发生了蠕变破坏。

3 低温流变性能

通过弯曲蠕变劲度试验以及得到的蠕变劲度、蠕变速率等指标分析 3 种改性沥青的低温流变性能。

3.1 蠕变劲度和蠕变速率

改性沥青在 -12 ℃、-18 ℃、-24 ℃ 温度条件下的蠕变劲度 S 和蠕变速率 m 分别如图 8 和图 9 所示。由图 8 可知:3 种改性沥青的蠕变劲度 S 随着温度的升高呈降低趋势,具体表现为 S 与温度呈指数关系且相关性较高;温度降低,高黏改性沥青与 SBS 改性沥青、橡胶改性沥青蠕变劲度之间的差异明显增大,而 SBS 改性沥青和橡胶改性沥青的差异则随着温度降低逐渐缩小;沥青的蠕变劲度 S 越大,在恒定应力下的应变响应越小,这对沥青的低温抗裂性能是不利的。由图 8 可知,3 种改性沥青蠕变劲度由大到小依次为 SBS 改性沥青、橡胶改性沥青、高黏改性沥青,因此高黏改性沥青低温抗裂性更好。

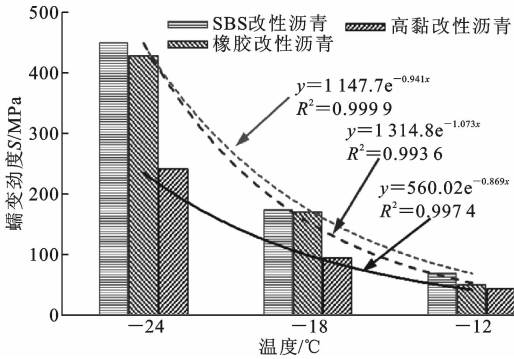


图 8 蠕变劲度 S 值

Fig. 8 Creep stiffness S

由图 9 可知:蠕变速率 m 值随着温度的升高呈增大趋势, m 与温度存在指数关系,且相关性较高;3 种改性沥青的蠕变速率在 -12 ℃和 -18 ℃ 温度条件下由大到小的顺序为橡胶改性沥青、SBS 改性沥青、高黏改性沥青;在 -24 ℃ 温度条件下由大到小的顺序为高黏改性沥青、橡胶改性沥青、SBS 改性

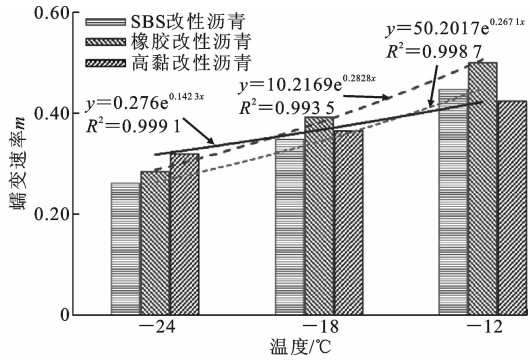


图 9 蠕变速率 m 值

Fig. 9 Creep rate m

沥青,蠕变速率越大,低温效果越好;在 -12 ℃和 -18 ℃ 温度条件下橡胶改性沥青的低温性能最好,在 -24 ℃ 温度条件下高黏改性沥青的低温性能最好,温度不同,改性沥青的低温性能不同,这可能与改性沥青的感温性有关。

3.2 低温感温性

研究表明^[29],蠕变劲度指数可以表征沥青的低温感温性,计算如下

$$\lg S = S_{TS} T + C \tag{6}$$

式中: S_{TS} 为蠕变劲度指数; T 为试验温度; C 为回归常数。

根据式(6)计算 3 种改性沥青的低温感温性,如图 10 所示。

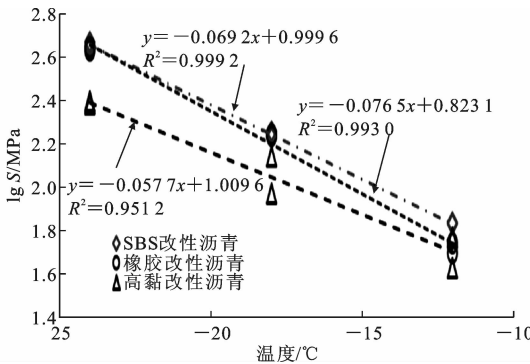


图 10 不同高性能改性沥青的 S_{TS}

Fig. 10 S_{TS} of different high-performance modified asphalts

由图 10 可知,SBS 改性沥青、橡胶改性沥青、高黏改性沥青的蠕变劲度指数分别为 0.069 2、0.076 5、0.057 7,三种改性沥青蠕变劲度的对数随温度变化从快到慢依次为橡胶改性沥青、SBS 改性沥青、高黏改性沥青,高黏改性沥青的温度敏感性最低,低温稳定性最好。

4 结 语

(1)SBS、橡胶和高黏改性沥青的低频复数剪切

模量相差较大,即高温性能相差较大;高频复数剪切模量相差较小,低温变形能力由大到小依次为 SBS 改性沥青、橡胶改性沥青、高黏改性沥青。

(2)不可恢复蠕变柔量越大,沥青抗永久变形能力越弱,高黏改性沥青的抗永久变形能力优于橡胶和 SBS 改性沥青;应力增大或者温度升高都会导致改性沥青的不可恢复蠕变柔量增大。

(3)温度降低,沥青的低温蠕变劲度增大,蠕变劲度与温度呈近似指数关系;温度降低,沥青的蠕变速率减小,蠕变速率与温度呈近似指数关系;高黏改性沥青的低温抗裂性优于 SBS 和橡胶改性沥青;可以用蠕变劲度指数表示改性沥青的低温感温性,高黏改性沥青的温度敏感性低于 SBS 和橡胶粉改性沥青的温度敏感性,高黏改性沥青的低温稳定性较好。

(4)本文仅研究了不同改性沥青的高低温流变性能,下一步可以采用时间扫描试验或线性振幅扫描试验研究不同改性沥青的疲劳流变性能。

参考文献:

References:

- [1] 蒋 玮,鲁贺贺,徐书东,等. 多孔沥青混合料 PAC-10 关键粒径与体积特征参数试验研究[J]. 公路,2019,64(1):211-217.
JIANG Wei,LU He-he,XU Shu-dong,et al. Research on the correlation between key particle size and volume characteristics of PAC-10[J]. Highway,2019,64(1):211-217.
- [2] JIANG W,HUANG Y,SHA A. A review of eco-friendly functional road materials[J]. Construction & Building Materials,2018,191:1082-1092.
- [3] FRIGIO F,PASQUINI E,PARTL M N,et al. Use of reclaimed asphalt in porous asphalt mixtures;Laboratory and field evaluations[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2014,27(7):04014211.
- [4] ZHANG Y,VAN DE VEN M,MOLENAAR A,et al. Preventive maintenance of porous asphalt concrete using surface treatment technology[J]. Materials & Design,2016,99:262-272.
- [5] MORIVOSHI A,JIN T,NAKAI T,et al. Construction and pavement properties after seven years in porous asphalt with long life[J]. Construction & Building Materials,2014,50:401-413.
- [6] 曹东伟,卢 杰,张海燕,等. 全透式沥青路面专用高黏度改性沥青性能对比[J]. 长安大学学报:自然科学版,2019,39(1):21-28.

CAO Dong-wei,LU Jie,ZHANG Hai-yan,et al. Contrastive on performance of fully permeable asphalt pavement dedicated high-viscosity modified asphalt [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2019,39(1):21-28.

- [7] 陈 玲,莫笑萍,白 璐,等. 橡胶沥青的环境影响及技术经济可行性分析[J]. 中国人口·资源与环境,2010,20(增1):391-394.
CHEN Ling,MO Xiao-ping,BAI Lu,et al. Environmental impact and technical and economic feasibility analysis of asphalt rubber[J]. China Population, Resources and Environment,2010,20(S1):391-394.
- [8] 谭忆秋,单丽岩. 沥青与沥青混合料黏弹特性[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2017.
TAN Yi-qiu,SHAN Li-yan. Viscoelastic characteristics of asphalt binder and asphalt mixture[M]. Harbin:Harbin Institute of Technology Press,2017.
- [9] 黄卫东,郑 茂,唐乃鹏,等. SBS 改性沥青高温性能评价指标的比较[J]. 建筑材料学报,2017,20(1):139-144.
HUANG Wei-dong,ZHENG Mao,TANG Nai-peng,et al. Comparison of evaluation parameters for high temperature performance of SBS modified asphalt[J]. Journal of Building Materials,2017,20(1):139-144.
- [10] 董文龙,关维阳,黄卫东. 不同老化状态下 SBS 改性沥青的低温性能分析[J]. 建筑材料学报,2018,21(2):268-274.
DONG Wen-long,GUAN Wei-yang,HUANG Wei-dong. Low temperature performance analysis of SBS modified asphalt under different aging process [J]. Journal of Building Materials,2018,21(2):268-274.
- [11] LAUKKANEN O V,SOENEN H,WINTER H H,et al. Low-temperature rheological and morphological characterization of SBS modified bitumen [J]. Construction & Building Materials,2018,179:348-359.
- [12] 张恒龙,徐国庆,朱崇政,等. 长期老化对基质沥青与 SBS 改性沥青化学组成、形貌及流变性能的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版,2019,39(2):10-18,56.
ZHANG Heng-long,XU Guo-qing,ZHU Chong-zheng,et al. Influence of long-term aging on chemical constitution, morphology and rheology of base and SBS modified asphalt [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2019,39(2):10-18,56.
- [13] 李 波,王 静,曹 贵,等. 废旧胶粉特性对橡胶沥青高温性能的影响机理[J]. 应用基础与工程科学学报,2017,25(2):347-355.
LI Bo,WANG Jing,CAO Gui,et al. Influence mechanism of crumb rubber characteristics on high-temper-

- ature performance for rubber modified asphalt binder [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25(2):347-355.
- [14] JEONG K D, LEE S J, AMIRKHANIAN S N, et al. Interaction effects of crumb rubber modified asphalt binders[J]. Construction & Building Materials, 2010, 24(5):824-831.
- [15] 郭贺源, 孟勇军, 徐锐光, 等. 石墨烯橡胶复合改性沥青流变性能及微观性能[J/OL]. 建筑材料学报, [2019-08-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.tu.20190827.0852.002.html>.
- GUO He-yuan, MENG Yong-jun, XU Rui-guang, et al. The rheological and microscopic properties of graphene rubber composite modified asphalt[J/OL]. Journal of Building Materials, [2019-08-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.tu.20190827.0852.002.html>.
- [16] 谭忆秋, 符永康, 纪伦, 等. 橡胶沥青低温评价指标[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(3):66-70.
- TAN Yi-qiu, FU Yong-kang, JI Lun, et al. Low-temperature evaluation index of rubber asphalt[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(3):66-70.
- [17] 马峰, 董文豪, 傅珍, 等. 基于流变学的 SEBS/橡胶粉复合改性沥青低温性能研究[J]. 功能材料, 2019, 50(6):6083-6087, 6094.
- MA Feng, DONG Wen-hao, FU Zhen, et al. Low temperature performance of compound modified asphalt with SEBS and rubber powder based on rheology[J]. Journal of Functional Materials, 2019, 50(6):6083-6087, 6094.
- [18] 张争奇, 田中男, 黄硕磊, 等. SBS-PU 改性高粘高弹沥青材料组成及工艺参数研究[J/OL]. 建筑材料学报, [2019-08-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.tu.20190226.1710.018.html>.
- ZHANG Zheng-qi, TIAN Zhong-nan, HUANG Shuo-lei, et al. Composition and process parameters of SBS-PU modified high-viscosity and high-elastic asphalt[J/OL]. Journal of Building Materials, [2019-08-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.tu.20190226.1710.018.html>.
- [19] 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.
- LI Meng-yi. Effect of high viscosity modifier on rheological property of asphalt[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(4):14-20.
- [20] 马翔, 倪富健, 陈荣生, 等. 排水性沥青混合料低温性能评价[J]. 公路交通科技, 2009, 26(6):8-12.
- MA Xiang, NI Fu-jian, CHEN Rong-sheng, et al. Evaluation of low-temperature performance of porous asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(6):8-12.
- [21] ZHANG F, HU C, ZHUANG W. The research for low-temperature rheological properties and structural characteristics of high-viscosity modified asphalt[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2018, 131(2):1025-1034.
- [22] ASTM D7517, Standard test method for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer[S].
- [23] ASTM D6648, Standard test method for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR)[S].
- [24] 谭华, 胡松山, 刘斌清, 等. 基于流变学的复合改性橡胶沥青黏弹特性研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(1):115-122.
- TAN Hua, HU Song-shan, LIU Bin-qing, et al. Study on viscoelastic properties of rubber modified asphalt based on rheology[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(1):115-122.
- [25] 林江涛, 梁皓, 樊亮. 基于时间及频率扫描的沥青高温性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(3):516-522.
- LIN Jiang-tao, LIANG Hao, FAN Liang. High and low temperature performance test of asphalt based on dynamic shear time and frequency scanning[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(3):516-522.
- [26] D'ANGELO J, KLUTTZ R, DONGRE R N, et al. Revision of the superpave high temperature binder specification: The multiple stress creep recovery test[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2007, 76:123-162.
- [27] AASHTO MP19-10, Standard specification for performance graded asphalt binder using multiple stress creep recovery (MSCR) test[S].
- [28] 田霜. 基于黏弹特性的沥青损伤演化规律分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- TIAN Shuang. Analysis of asphalt damage evolution based on viscoelastic characteristics[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [29] 董瑞琨, 孙立军. 考虑老化的沥青结合料低温感温性指标[J]. 中国公路学报, 2006, 19(4):34-39.
- DONG Rui-kun, SUN Li-jun. Low temperature susceptibility indexes of asphalt binder with different aging degree[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4):34-39.