

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2024.07.002

粉煤灰复合 SBS 改性沥青流变性能试验研究

胡翌刚^{*1}, 袁臻², 杨毅^{2,3}

(1. 湖南省交通建设质量安全监督管理局, 湖南 长沙 410116; 2. 现代投资股份有限公司, 湖南 长沙 410004;
3. 湖南省怀芷高速公路建设开发有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 为了研究温度和老化作用对粉煤灰/SBS 复合改性沥青流变性能的影响, 制备了3种类型的改性沥青样品: 粉煤灰改性沥青, SBS 改性沥青和粉煤灰/SBS 复合改性沥青。通过系统的室内试验, 详细评估了不同温度条件和老化程度对不同改性沥青的流变性能和疲劳性能的影响。试验结果表明, 沥青的复数模量随着加载频率的增加而显著增加。此外, 未老化沥青和短期老化沥青在储能模量和损耗模量方面对温度的敏感性最低。然而, 当沥青经过长期老化之后, 10%粉煤灰改性沥青的性能更易受温度变化的影响。进一步分析显示, 与基质沥青相比, 10%粉煤灰/2% SBS 复合改性沥青在不同温度条件下的疲劳寿命显著提高。在 10, 20, 30 °C 条件下, 疲劳寿命分别提高了 60.14%, 43.39%, 48.93%。这些结果表明, 粉煤灰/SBS 复合改性沥青在低温条件下表现出优良的抗变形能力和抗疲劳性能。综合考虑, 粉煤灰/SBS 复合改性沥青不仅在提高沥青性能方面显示出显著优势, 还在延长道路使用寿命和提高道路安全性方面具有重要潜力。其具有良好的低温抗变形能力、抗疲劳性能, 在中国公路的建设与养护中有广泛的应用前景。

关键词: 道路工程; 粉煤灰; 室内试验; SBS 改性沥青; 流变性能; 疲劳性能

中图分类号: U414

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2024) 07-0014-09

Experimental Study on Rheological Property of Fly Ash Composite SBS Modified Asphalt

HU Yi-gang^{*1}, YUAN Zhen², YANG Yi^{2,3}

(1. Hunan Provincial Transportation Construction Quality and Safety Supervision Administration, Changsha, Hunan 410116, China;
2. Xian Dai Tou Zi Co., Ltd., Changsha, Hunan 410004, China;
3. Hunan Provincial Huaihua-Zhijiang Construction and Development Co., Ltd., Changsha, Hunan 410004, China)

Abstract: To conduct an in-depth study on the influence of temperature and aging on the rheological properties of fly ash composite SBS modified asphalt, 3 types of modified asphalt samples were prepared: fly ash modified asphalt, SBS modified asphalt, and fly ash composite SBS modified asphalt. The influence of different temperature conditions and aging levels on these modified asphalts' rheological and fatigue properties was thoroughly evaluated by using systematic laboratory tests. The result indicates that the complex modulus of asphalt significantly increases with the loading frequency. Additionally, the unaged asphalt and short-term aged asphalt exhibit the lowest temperature sensitivity in terms of storage modulus and loss modulus; however, when the asphalt undergoes long-term aging, 10% fly ash-modified asphalt performance becomes more susceptible to temperature variation. The further analysis reveals that compared to base asphalt, the fatigue life of 10% fly ash and 2% SBS composite modified asphalt is significantly improved under different temperature conditions. At 10 °C, 20 °C, and 30 °C, the fatigue life increases by 60.14%, 43.39%, and 48.93% respectively. These results indicate that fly ash composite SBS modified asphalt

收稿日期: 2024-03-29

作者简介 (* 通讯作者): 胡翌刚 (1975-), 男, 湖南衡山人, 硕士, 高级工程师. (978897446@qq.com)

exhibits excellent deformation resistance and fatigue performance under low-temperature conditions. Considering all factors, fly ash composite SBS modified asphalt shows significant advantages in improving asphalt performance, and holds substantial potential in extending road service life and enhancing road safety.

Key words: road engineering; fly ash; laboratory test; SBS modified asphalt; rheological property; fatigue performance

0 引言

沥青路面作为我国高速公路的主要路面类型,在服役过程中经常受到大气、阳光和水的影响,导致沥青老化,产生各种路面病害,降低了路面的使用性能和行车舒适性^[1-4]。目前,常见的抗老化手段包括添加抗老化材料、沥青微波辐射处理、制备超薄磨耗层以及沥青强化蒸馏等方法^[5-9]。然而,现有的抗老化材料研究相对单一,深入研究沥青路面抗老化材料能够从根本上改善沥青的抗老化性能,提升路面的耐久性。

目前,SBS,PE,SBR等聚合物改性沥青被广泛用于高等级公路的建设。这是由于其可以有效改变沥青内部结构,从而提高沥青的路用性能^[10-13]。然而,在实际的道路工程中,即使采用了聚合物改性沥青,仍有少部分路面病害产生。另外一方面,聚合物改性沥青的价格比较昂贵^[14]。所以,在现有聚合物改性沥青研究成果的基础上,进一步优化沥青性能,在不增加过多成本的前提下提高沥青路面性能才能在工程中得以广泛应用。

粉煤灰在沥青路面中的应用涉及将其作为矿物填料或传统骨料或黏合剂的部分替代品^[15]。粉煤灰是电厂燃煤过程中的副产物,可以改善沥青混合料的力学性能,并有助于废物材料的回收利用,促进道路建设的可持续性。粉煤灰在沥青中的使用可以增强其耐久性,减少水敏感性,有利于降低建设成本,同时通过重新利用工业废料减少环境影响。陈志国^[16]集合西部交通建设科技项目,使用火山灰与SBS聚合物进行复合改性,同时提高了沥青胶浆的高低温性能。而粉煤灰与火山灰具有轻质、粒度细、多孔、比表面大等特点,有效地增加了沥青与集料的黏附性,其施工性较强^[17-18]。在聚合物改性沥青的基础上进一步优化网络结构,可以改善沥青的路用性能。

综上,本研究制备了粉煤灰改性沥青、SBS改性沥青以及粉煤灰/SBS复合改性沥青,通过系统试验评价温度和老化作用对不同改性沥青流变性能的影响,为粉煤灰/SBS复合改性沥青在道路建设和养护中的应用提供参考,具有一定的经济效益和社会效益。

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

基质沥青采用AH70[#]A级道路石油沥青,检测结果如表1所示;SBS改性剂选用湖南某石化公司的SBS1401颗粒,检测结果如表2所示;粉煤灰是一种燃煤发电厂排出的废弃物,具有多孔结构,本研究采用的粉煤灰化学组成成分如表3所示。为了更好地激活粉煤灰中的铝硅酸盐前驱体,将NaOH和Na₂SiO₃以2:1的质量比掺入粉煤灰中。

表1 基质沥青性能指标

Tab.1 Performance indicators of matrix asphalt

技术指标	针入度/ (0.1 mm)	软化点/℃	延度/cm	动力黏度/ (Pa·s)
试验结果	70.2	48.6	37.8	203

表2 SBS改性剂指标

Tab.2 Technical indicators of SBS modifier

技术指标	硬度	撕裂强度/ (kN·m ⁻¹)	拉伸强度/ MPa	扯断伸长 率/%	300%定伸 应力/MPa
试验结果	76	55	25	751	2.8

表3 粉煤灰化学组成成分

Tab.3 Chemical composition of fly ash

成分/%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O
粉煤灰	57.3	24.5	4.15	9.18	1.59	0.86	2.42

1.2 改性沥青的制备

(1) 粉煤灰改性沥青

粉煤灰改性沥青采用高速剪切仪制备。先将基质沥青加热至140℃,然后分别将5%,10%,15%粉煤灰掺入到基质沥青中,用高速剪切仪以2 000 r/min的速度搅拌60 min,温度保持在140℃。

(2) SBS改性沥青

先将基质沥青加热至170℃,然后将2%SBS掺入到基质沥青中,用高速剪切仪以2 000 r/min的速度搅拌60 min,温度保持在170℃,SBS改性沥青制备完成。

(3) SBS/粉煤灰复合改性沥青

在SBS改性沥青的基础上,掺入10%粉煤灰至SBS改性沥青中,采用高速剪切仪以2 000 r/min的

速度搅拌 30 min, 最后使用 1 000 r/min 的速率搅拌 60 min, 制备得到粉煤灰/SBS 复合改性沥青。

1.3 试验方法

1.3.1 老化过程

根据规范《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011) 中的 T0610—2011 和 T0630—2011 试验方法, 通过旋转薄膜加热试验 (RTFOT) 对不同沥青进行短期老化 (85 min), 通过压力老化容器加速沥青老化试验 (PAV) 对沥青进行长期老化 (20 h)^[19]。

1.3.2 动态剪切流变试验

根据规范 AASHTO T315 和 JTG E50 2011 开展动态剪切流变试验用于评价改性沥青流变性能^[20-21]。采用频率扫描试验评价加载频率、温度和改性剂掺量和类型对沥青胶结料流变性能的影响。其中, 本研究使用的加载频率扫描范围从 0.01~15 Hz, 试验温度选择 5, 10, 15, 20, 25, 30 ℃。

1.3.3 抗疲劳性能试验

根据 AASHTO TP101, 通过采用线性振幅扫描的重复加载试验, 用于评价沥青胶结料的抗疲劳损伤性能^[21]。试验温度分别为 10, 20, 30 ℃。

1.3.4 弯曲蠕变劲度试验

通过开展弯曲蠕变劲度试验评价不同改性沥青的低温性能。根据 ASTM D6628 和 JTG E50 2011 规范开展该试验测定沥青的弯曲蠕变劲度和蠕变速率用于对比沥青胶结料低温性能, 试验温度采用 -12, -18, -24 ℃。

2 试验结果分析与讨论

2.1 基础物理性能结果

本研究按粉煤灰掺入到沥青中的质量百分比分别为 5%, 10%, 15%, SBS 掺入到沥青中的质量百分比为 2%, 复合改性沥青的粉煤灰掺量为 10% SBS 掺量为 2%。研究了不同改性沥青对沥青性能的影响, 结果如图 1 所示。从结果中可以发现随着粉煤灰掺量的增加, 沥青的软化点增加、延度下降、黏度提升。软化点和黏度的提高百分比高于延度下降的百分比。上述结果表明粉煤灰的掺入会导致沥青塑性下降、黏性增大。而相较于 10% 粉煤灰改性沥青而言, 2% SBS 掺入 10% 粉煤灰改性沥青中, 基础物理性能均有所提升。这是由于粉煤灰作为细颗粒材料, 通过物理填充效应、颗粒增强效应和界面效应, 显著提高了沥青的软化点和黏度。而 SBS 作为高分子材料, 通过分子链增韧作用、相容性和相互

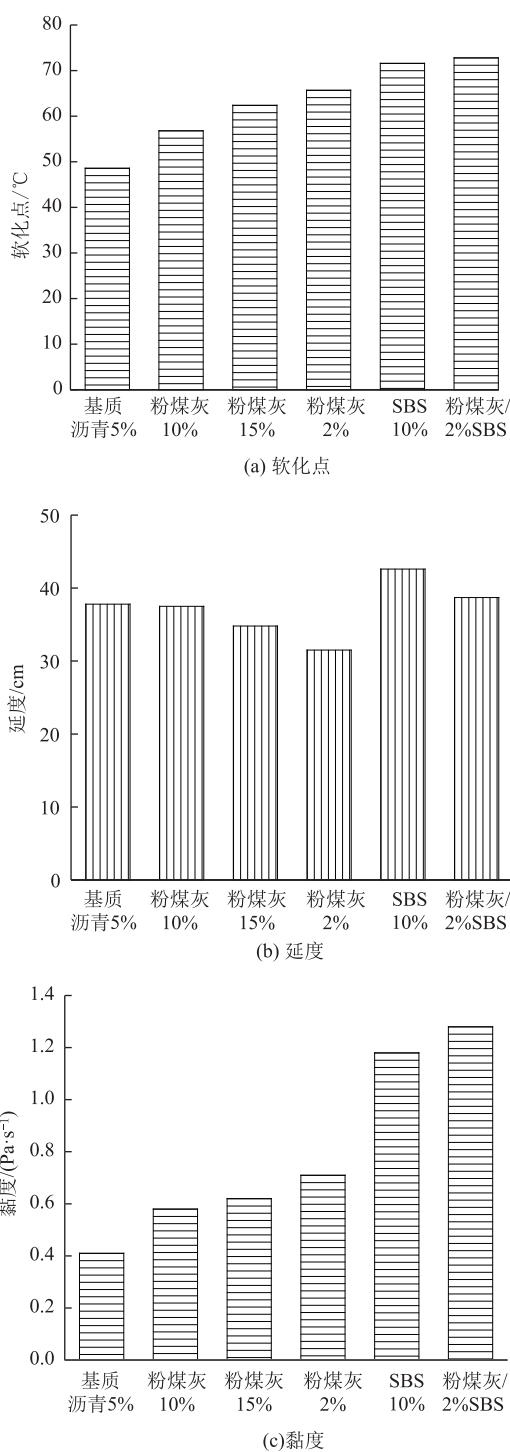


图1 不同沥青的基础物理性能

Fig. 1 Basic physical properties of different asphalt

作用及其与粉煤灰的协同增强效应, 改善了粉煤灰改性沥青的延度。

2.2 动态剪切流变试验结果分析

本研究通过开展动态剪切流变试验得到了不同温度不同改性沥青的频率扫描试验结果, 所有的沥青试样均进行了长期老化。为了增强试验结果的适用性, 进一步采用时温等效原理将不同温度下的频

率扫描结果进行水平位移,得到规定温度条件下的动态剪切模量主曲线,以有效地表征沥青黏弹性特征。模量主曲线方程如式(1)所示;采用WLF非线性拟合方程计算温度位移因子,如式(2)所示^[22]。

$$G^* = \frac{G_g^*}{[1 + (f_e/f')^k]^{m_e/k}}, \quad (1)$$

式中, G^* 为复数前切模量; G_g^* 为玻璃态复数剪切模量; f_e 为交叉频率; f' 为频率; k , m_e 为拟合参数。

$$\lg \alpha_T = \frac{-C_1(T - T_g)}{C_2 + T - T_g}, \quad (2)$$

式中, α_T 为温度位移因子; C_1 和 C_2 为材料常数; T 为试验温度; T_g 为基准温度。

根据不同温度频率扫描结果以及时温等效原理,可以得到 20 ℃ 条件下不同沥青的主曲线,如图 2 所示。图 2 中横坐标为加载频率的对数,纵坐标为沥青复数模量的对数,复数模量是材料抗车辙变形能力的指标。从图 2 中可以看出,粉煤灰和 SBS 改性剂两者对沥青黏弹性行为有显著的影响。6 种沥青的复数模量均随着加载频率的增加而增加。在不同频率条件下,5% 掺量的粉煤灰具有最大的复数模量。在低频条件下,随着粉煤灰掺量增加,复数模量有所降低。但是随着频率增加,改性沥青的复数模量均高于基质沥青。

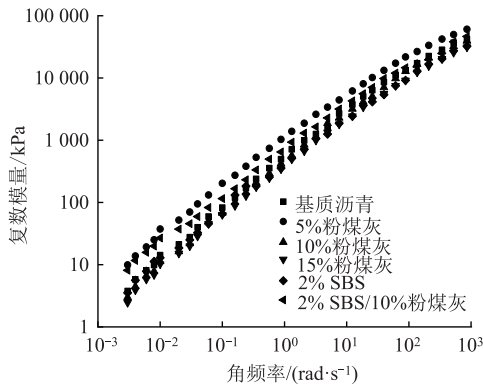


图 2 不同沥青的复数模量主曲线

Fig. 2 Complex modulus principal curves of different asphalt

图 3~图 5 对比了在双对数坐标下未老化、短期老化和长期老化作用下不同沥青储能模量、损耗模量和温度的关系。从图中可以发现,在双对数坐标下,模量和温度之间呈现线性关系,表 4 列出了不同老化程度下储能模量和损耗模量拟合曲线的斜率,其表示沥青对温度的敏感性。斜率越大,沥青对温度的变化越敏感。试验结果表明随着老化程度的增加,沥青模量明显增大,拟合曲线斜率减小。未老

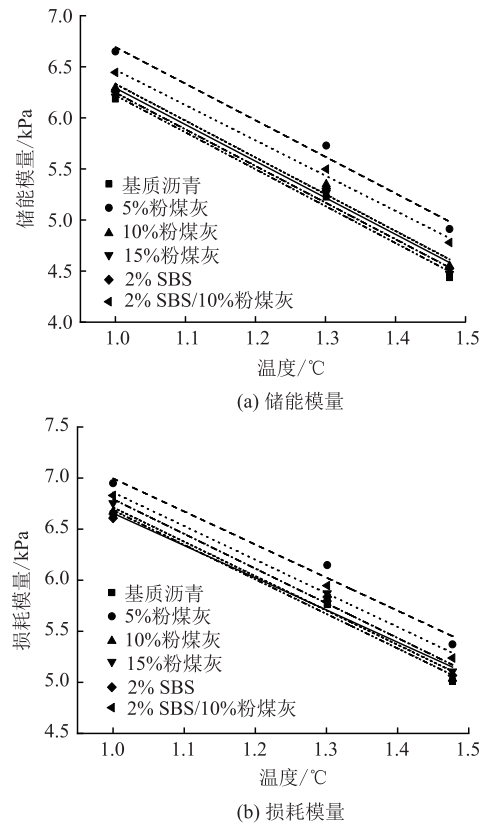
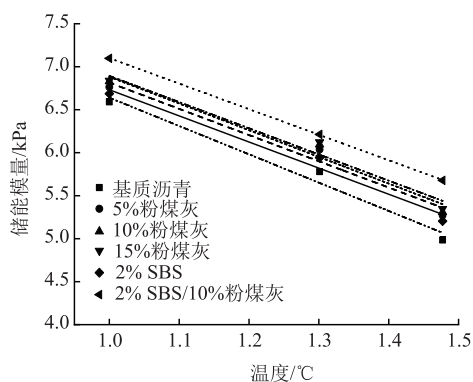


图 3 不同温度下未老化沥青复数模量

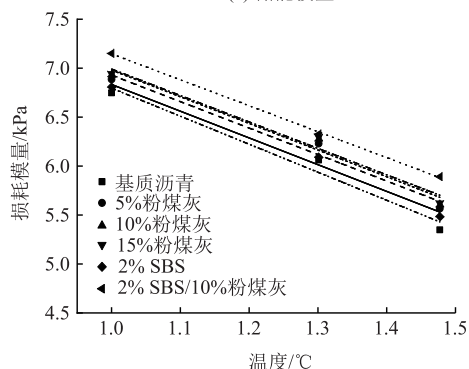
Fig. 3 Complex modulus of unaged asphalt at different temperatures

化沥青和短期老化沥青的储能模量和损耗模量对温度敏感性最低。这是因为老化过程中发生了一系列物理和化学变化,使其由软变硬,弹性比例增大,黏性成分降低。这种变化主要是由于沥青中的轻质组分挥发以及氧化反应导致的分子结构复杂化和交联密度增加,进而使得老化后的沥青模量增大,温度敏感性降低。此外,从表 4 可以看出,当沥青经过长期老化之后,10% 粉煤灰改性沥青更容易受温度的影响。这可能是由于粉煤灰的存在使得沥青在老化过程中形成更多的刚性结构,这些刚性结构对温度变化更加敏感,导致储能模量和损耗模量的温度敏感性增加。

当储能模量与损耗模量相等时,即相位角为 45° 的时候,对应的复数模量为交叉模量。当相位角小于 45° 时,材料偏弹性;当相位角大于 45° 时,材料偏黏性。图 6 为 20 ℃ 条件下长期老化下不同沥青的交叉模量结果。从结果中可以看出,与基质沥青相比,改性沥青具有更大的交叉模量。改性剂对交叉模量具有一定的影响。当掺入 10% 粉煤灰时,改性沥青交叉模量增加了 35.9%,这表明粉煤灰对沥青的黏弹性行为产生了一定的影响。粉煤灰通过物理



(a) 储能模量



(b) 损耗模量

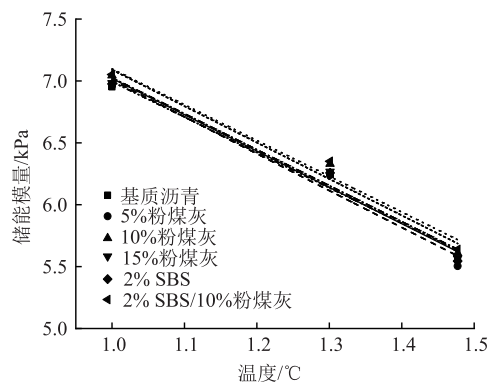
图4 不同温度下短期老化沥青复数模量

Fig. 4 Complex modulus of short-term aged asphalt at different temperatures

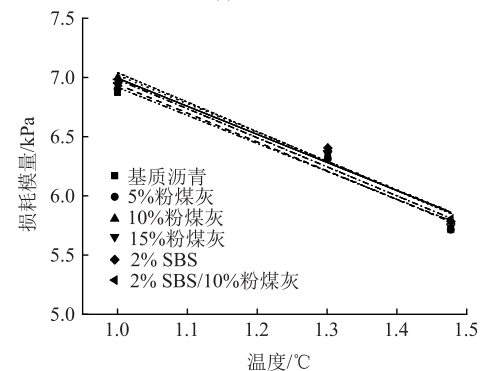
填充效应和颗粒增强效应,增加了沥青的刚性结构,使其弹性成分比例提高,进而提高了交叉模量。当掺入2%SBS时,改性沥青交叉模量与基质沥青交叉模量相近,表明SBS改性沥青抗老化性较低。这可能是因为SBS虽然能提高沥青的弹性,但其在长期老化过程中容易发生降解,导致性能下降。而粉煤灰/SBS复合改性沥青有效地提高了SBS改性沥青的抗老化性能,这种协同增强效应使得复合改性沥青在长期老化后仍能保持较高的交叉模量,从而改善了其黏弹性行为。

2.3 抗疲劳性能试验

为了研究温度对不同沥青疲劳性能的影响。对6种沥青长期老化后的试验分别在10, 20, 30℃条件下的线性振幅扫描试验结果进行分析。Wang等^[23]王超基于虚应变能理论提出了将最大存储能峰值点作为线性振幅扫描试验中沥青疲劳失效的判断依据。本研究根据该方法对不同改性沥青不同温度条件下的疲劳性能进行了对比分析,结果如图7和图8所示。图7是20℃条件下不同沥青应力-应变曲线。从图7中可以看出基质沥青的峰值要低于改性沥



(a) 储能模量



(b) 损耗模量

图5 不同温度下长期老化沥青复数模量

Fig. 5 Complex modulus of long-term aged asphalt at different temperatures

表4 拟合方程斜率对比

Tab. 4 Comparison of slopes of fitted equations

沥青类型	储能模量斜率			损耗模量斜率		
	未老化	短期老化	长期老化	未老化	短期老化	长期老化
基质沥青	-3.612	-3.294	-2.857	-3.381	-2.862	-2.363
5%粉煤灰	-3.579	-3.050	-2.941	-3.238	-2.703	-2.433
10%粉煤灰	-3.6	-3.106	-2.979	-3.363	-2.722	-2.492
15%粉煤灰	-3.585	-3.046	-2.906	-3.398	-2.701	-2.454
2%SBS	-3.581	-3.038	-2.933	-3.156	-2.730	-2.372
2%SBS/ 10%粉煤灰	-3.452	-2.972	-2.893	-3.293	-2.649	-2.417

青。复合改性沥青的应力-应变曲线的峰值最高。进一步对比不同温度条件下不同沥青的疲劳寿命,从图8可以看出在不同温度条件下,改性沥青的疲劳寿命远远大于基质沥青,粉煤灰/SBS复合改性沥青的疲劳性能均优于SBS改性沥青和不同掺量粉煤灰改性沥青。与基质沥青相比,复合改性沥青疲劳寿命在10, 20, 30℃条件下分别提高了60.14%, 43.39%, 48.93%。在其他改性沥青中,15%粉煤灰掺量改性沥青具有最大的疲劳寿命。与基质沥青相比,15%粉煤灰掺量改性沥青疲劳寿命在10, 20,

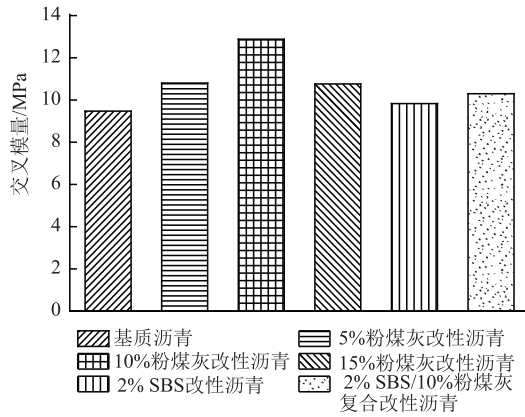


图 6 改性剂对沥青交叉模量的影响

Fig. 6 Influence of modifiers on asphalt cross modulus

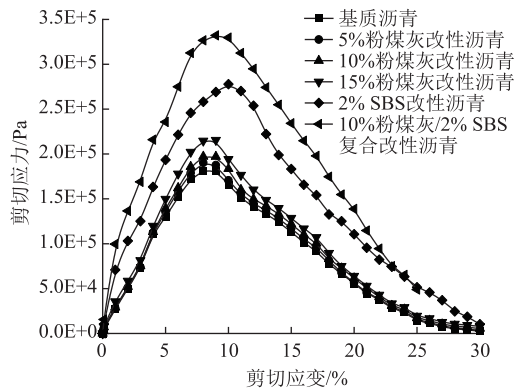


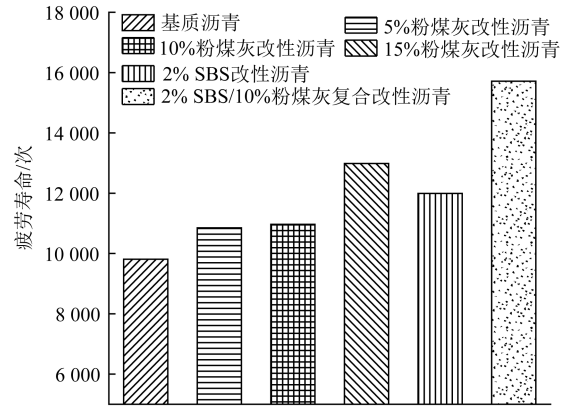
图 7 20 °C时不同改性沥青的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of different modified asphalts at 20 °C

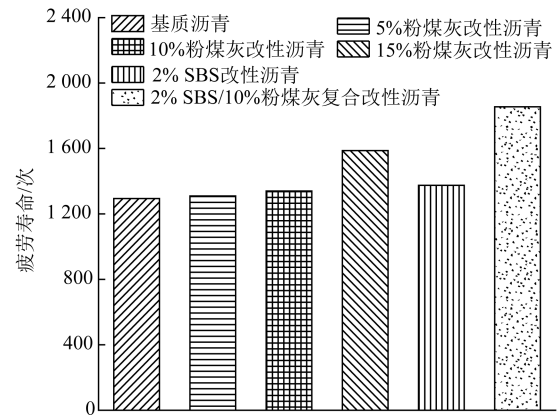
30 °C 条件下分别提高了 32.34%, 22.64%, 19.17%。这可能是由于粉煤灰颗粒填充在基质沥青中, 增加了材料的密实度和抗变形能力, 提高了抗裂性能, 减少了疲劳裂缝的形成和扩展。同时, 粉煤灰的存在可以降低材料内部应力集中, 从而延缓疲劳破坏的发生。

2.4 弯曲蠕变劲度试验

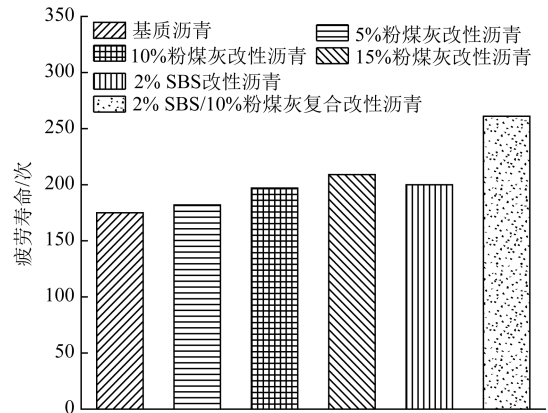
弯曲蠕变劲度和蠕变速率是评价沥青低温性能的关键参数^[24]。弯曲蠕变劲度越大, 蠕变速率越低, 低温抗变形能力越弱。图 9 是不同温度不同沥青的弯曲蠕变劲度结果。当温度为-12 °C 时, 与基质沥青相比, 掺入 5% 和 10% 粉煤灰使得沥青的劲度模量降低。这结果表明沥青低温柔性更佳, 其低温抗裂性能提升。粉煤灰通过物理填充效应增加了沥青的密实度, 同时其细小颗粒在低温下能够减缓应力集中, 减少裂纹的形成。然而, 与其他改性沥青和基质沥青相比, 2% SBS 改性沥青的弯曲劲度模量最低, 其低温抗裂性能最佳。这是因为 SBS 高分子结构在低温下保持了良好的弹性和柔性, 有效地吸



(a) 10 °C



(b) 20 °C



(c) 30 °C

图 8 不同温度不同沥青疲劳性能试验结果

Fig. 8 Test results of fatigue performance of different asphalts at different temperatures

收了应力, 防止了裂缝的扩展。当温度为-18 和 -24 °C, 不同改性沥青弯曲劲度变化趋势不一样。在这两种温度条件下, 15% 掺量粉煤灰沥青弯曲劲度小于 5% 和 10% 掺量粉煤灰沥青, 说明更高掺量的粉煤灰提供了更多的微粒结构, 增强了材料的抗裂性能。2% SBS 改性沥青的弯曲劲度仍然最低, 说明 SBS 改性沥青低温性能优于其他改性沥青。当温度

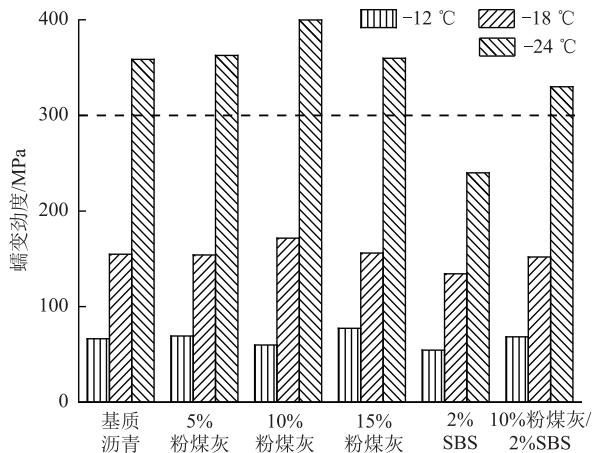


图9 不同温度不同改性沥青的弯曲蠕变劲度

Fig. 9 Flexural creep strength of different modified asphalts at different temperatures

为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 6种沥青的弯曲劲度均小于 300 MPa , 满足规范要求。而当温度为 $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 只有2% SBS 改性沥青弯曲劲度小于 300 MPa , 其余的均不满足要求。这进一步证明了 SBS 的低温性能优势, 特别是在极低温条件下, 其优异的弹性和柔性能显著降低劲度模量, 提升抗裂性能。

蠕变速率 (m) 表征沥青在低温下的应力松弛能力。 m 值越大, 温度下降时沥青吸收应力能力越强, 低温抗开裂性能越强。图 10 是不同温度不同改性沥青的蠕变速率试验结果。当温度为 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 10%粉煤灰和 2% SBS 沥青的蠕变速率高于其他几种沥青。这表明与其他沥青相比, 这两种改性沥青应力释放能力更强。这是因为 10%粉煤灰提供了足够的微粒填充效应, 而 SBS 在低温下保持了良好的弹性, 增强了应力松弛能力。当温度为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 5%粉煤灰和复合改性沥青的 m 值增大, 改性沥青低温性能增强, 且 m 值均大于 0.3。当温度为 $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 5%, 10%粉煤灰改性沥青的 m 值均低于基质沥青, 且低于 0.3。15%粉煤灰和复合改性沥青的 m 值与基质沥青的 m 值相近, 但 6 种沥青的 m 值均低于 0.3, 低温性能不能满足要求。综上所述, 掺加粉煤灰和 SBS 后会使得沥青低温流变性能提升, 粉煤灰通过物理填充效应和颗粒增强效应提高了沥青的抗裂性能, 而 SBS 通过其高分子结构增强了材料的弹性和应力松弛能力。但不同温度条件下, 粉煤灰掺量对沥青低温性能影响不一样, 2% SBS 改性沥青在所有低温条件下均表现出最佳的低温流变性能。这说明在低温抗裂性能上, SBS 的改性效果更为显著。

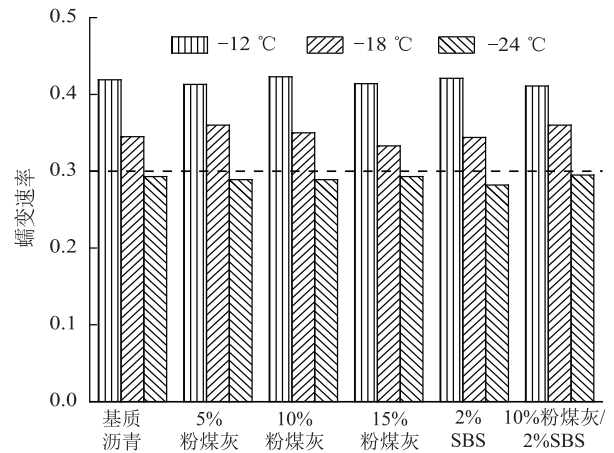


图10 不同温度不同改性沥青的蠕变速率

Fig. 10 Creep rate of different modified asphalts at different temperatures

3 结论

本研究制备了不同掺量粉煤灰改性沥青、SBS 改性沥青和粉煤灰/SBS 复合改性沥青。通过室内试验研究了温度和老化作用对不同改性沥青性能的影响。得出以下主要结论:

(1) 沥青的复数模量均随着加载频率的增加而增加。在不同频率条件下, 5%掺量的粉煤灰具有最大的复数模量。随着老化程度的增加, 沥青模量明显增大, 拟合曲线斜率减小。未老化沥青和短期老化沥青的储能模量和损耗模量对温度敏感性最低。当沥青经过长期老化之后, 10%粉煤灰改性沥青性能更容易受温度的影响。10%粉煤灰/2% SBS 复合改性沥青有效地提高了 SBS 改性沥青的抗老化性能。

(2) 与基质沥青相比, 10%粉煤灰/2% SBS 复合改性沥青疲劳寿命在 10, 20, 30 $^{\circ}\text{C}$ 条件下分别提高了 60.14%, 43.39%, 48.93%。15%粉煤灰掺量改性沥青疲劳寿命在 10, 20, 30 $^{\circ}\text{C}$ 条件下分别提高了 32.34%, 22.64%, 19.17%。10%粉煤灰/2% SBS 复合改性沥青有效地提高了 SBS 改性沥青的疲劳性能。

(3) 2% SBS 和 10%粉煤灰/2% SBS 复合改性沥青具有更低的劲度模量和更大的蠕变速率, 这两种改性沥青低温性能最佳。粉煤灰的掺入会降低沥青的低温抗裂性能。而 10%粉煤灰/2% SBS 复合改性沥青有效地提高了粉煤灰改性沥青的低温性能。

(4) 本研究选取了 10%粉煤灰+2% SBS 制备了复合改性沥青。在今后的研究中, 可以通过试验设计确定出最佳制备工艺, 并以此制备沥青混合料, 通过室内试验对混合料的性能进行验证。

参考文献:

References:

- [1] 郭猛,任鑫,焦峪波,等. 沥青及沥青混合料老化与抗老化研究综述 [J]. 中国公路学报, 2022, 35 (4): 41-59.
GUO Meng, REN Xin, JIAO Yu-bo, et al. Review on Aging and Anti-aging of Asphalt and Asphalt Mixture [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35 (4): 41-59.
- [2] 王林,韦金城,张晓萌,等. “四个一体化”破解长寿命沥青路面技术瓶颈 [J]. 科学通报, 2020, 65 (30): 3238-3246.
WANG Lin, WEI Jin-cheng, ZHANG Xiao-meng, et al. “Four Integrations” to Solve the Technical Bottleneck of Long-life Asphalt Pavement [J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 65 (30): 3238-3246.
- [3] 谢恩连,肖璇,侯剑楠,等. 水光耦合老化对橡胶改性沥青性能影响研究 [J]. 公路工程, 2023, 48 (3): 154-160, 172.
XIE En-lian, XIAO Xuan, HOU Jian-nan, et al. Effects of Water-light Coupling Aging on Performance of Crumb Rubber Modified Asphalt [J]. Highway Engineering, 2023, 48 (3): 154-160, 172.
- [4] 芦军. 沥青路面老化行为与再生技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2008.
LU Jun. Study on Aging Behavior and Regeneration Technology of Asphalt Pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [5] 樊钊甫. 基于沥青老化的沥青微观特性基础理论研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
FAN Zhao-fu. Theoretical Research on Asphalt Micro Characteristics based on Asphalt Aging [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [6] 徐松,罗宇洋,黄润雨,等. 有机LDHs的制备及其对沥青抗紫外老化性能的影响 [J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45 (7): 7-13.
XU Song, LUO Yu-yang, HUANG Run-yu, et al. Preparation of Organic LDHs and Their Effects on the UV Aging Resistance of Asphalt [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2023, 45 (7): 7-13.
- [7] YIN J M, WANG S Y, LV F R. Improving the Short-term Aging Resistance of Asphalt by Addition of Crumb Rubber Radiated by Microwave and Impregnated in Epoxidized Soybean Oil [J]. Construction and Building Materials, 2013, 49: 712-719.
- [8] 中交上海港湾工程设计研究院有限公司, 中交第三航务工程局有限公司. 一种耐紫外老化超薄磨耗层及其制备方法: CN201810060759. 7 [P]. 2018-06-22.
CCCC Shanghai Harbor Engineering Design and Research Institute Co., Ltd. and CCCC Third Harbor Engineering Bureau Co., Ltd. An Ultra-thin Wearing Course Resistant to Ultraviolet Aging and its Preparation Method: CN201810060759. 7 [P]. 2018-06-22.
- [9] 中国石油化工股份有限公司, 中国石油化工股份有限公司抚顺石油化工研究院. 一种抗老化道路沥青的生产方法: CN02144541. 9 [P]. 2004-05-05.
China Petroleum Chemical Co, China Petroleum Chemical Co Fushun Petroleum and Chemical Research Institute. An Anti-Aging Road Asphalt Production Method: CN02144541. 9 [P]. 2004-05-05.
- [10] WU W J, CAVALI M C, JIANG W, et al. Differing Perspectives on the Use of High-content SBS Polymer-Modified Bitumen [J/OL]. Construction and Building Materials, 2024, 411: 134433. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134433>.
- [11] ZHANG J J, SUN P W, MA Z F, et al. Investigating the role of Sulfur Stabilizer in Modulating Aging Properties of SBS-Modified Asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2024, 425: 136045. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136045>.
- [12] GONG M H, YANG J, YAO H M, et al. Investigating the Performance, Chemical, and Microstructure Properties of Carbon Nanotube-Modified Asphalt Binder [J/OL]. Road Materials & Pavement Design, 2017 (5): 1-24. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1323661>.
- [13] 蔡邦,邓亚军,朱兴龙,等. SBR与生物油恢复老化SBS改性沥青性能及机理研究 [J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21 (1): 39-49.
CAI Bang, DENG Ya-jun, ZHU Xing-long, et al. Performances of Aged SBS Modified Asphalt Regenerated with SBR and Bio-oil and the Regeneration Mechanism [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2024, 21 (1): 39-49.
- [14] 汪海,苏怡,周钊,等. 基于DSR的不同SBS改性沥青高温流变性能分析 [J]. 湖南交通科技, 2023, 49 (4): 18-25, 29.
WANG Hai, SU Yi, ZHOU Zhao, et al. Analysis of High Temperature Rheological Properties of Different SBS Modified Asphalt based on DSR [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2023, 49 (4): 18-25, 29.
- [15] 张思峰,王雨佳,高立勇,等. 流态粉煤灰路基填料配合比设计及路用性能试验研究 [J]. 公路交通科技, 2023, 40 (6): 84-92.
ZHANG Si-feng, WANG Yu-jia, GAO Li-yong, et al.

- Experimental Study on Mix Design and Road Performance of Fluid Fly Ash Subgrade Filler [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40 (6): 84-92.
- [16] 陈志国. 火山灰沥青胶浆路用性能的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- CHEN Zhi-guo. Research on Performance of Volcanic Ash Asphalt Mastic [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [17] 吴平, 王选仓. 粉煤灰特性对沥青混合料性能的影响 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (12): 21-28.
- WU Ping, WANG Xuan-cang. Effect of Property of Fly Ash on Performance of Asphalt Mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (12): 21-28.
- [18] 李会强, 徐需. 预处理粉煤灰作为填料的沥青胶浆性能研究 [J]. 公路交通技术, 2022, 38 (3): 21-26.
- LI Hui-qiang, XU Pei. Study on Performance of Asphalt Mastic with Retreated Fly Ash as Filler [J]. Technology of Highway and Transport, 2022, 38 (3): 21-26.
- [19] 蒋应军, 张文辉, 张嘉伟, 等. 不同成型方法 SMA-13 混合料性能评价 [J]. 公路交通科技, 2023, 40 (10): 35-42.
- JIANG Ying-jun, ZHANG Wen-hui, ZHANG Jia-wei, et al. Performance Evaluation on SMA-13 Mixture by Different Molding Methods [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40 (10): 35-42.
- [20] 张海红. 多聚磷酸对不同基质沥青性能的影响研究 [J]. 公路交通科技, 2024, 41 (3): 19-25.
- ZHANG Hai-hong. Influence of Polyphosphoric Acid on Various Base Asphalt Performance [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41 (3): 19-25.
- [21] 钟献科. 不同制备工艺的温拌橡胶沥青性能 [J]. 公路交通科技, 2024, 41 (3): 26-34.
- ZHONG Xian-ke. Performance of Warm-mix Rubber Asphalt with Different Preparation Processes [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41 (3): 26-34.
- [22] 尹应梅. 基于 DMA 法的沥青混合料动态粘弹特性及剪切模量预估方法研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- YIN Ying-mei. Shear Modulus Predicting Methods for Asphalt Mixtures based on Dynamic Mechanical Analysis (DMA) Means [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [23] WANG Chao, CASSIE C, ZHANG J X, et al. Unified Failure Criterion for Asphalt Binder under Cyclic Fatigue Loading [J]. Road Materials and Pavement Design, 2015, 16 (2): 125-148.
- [24] 宋云连, 高盼, 蒋宇. 盐冻条件下沥青混合料低温性能研究 [J]. 中外公路, 2023, 43 (4): 230-235.
- SONG Yun-lian, GAO Pan, JIANG Yu. Study on Low Temperature Performance of Asphalt Mixture under Salt Freezing Condition [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43 (4): 230-235.