

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022012223101998

文章编号:1674-599X(2023)05-0074-10

引用格式:邱超,秦仁杰,邱冬华,等.聚氨酯复配SBS改性沥青路用性能研究[J].交通科学与工程,2023,39(5):74-83.

Citation: QIU Chao, QIN Renjie, QIU Donghua, et al. Study on road performance of PU compound SBS modified asphalt [J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(5): 74-83.

聚氨酯复配SBS改性沥青路用性能研究

邱超¹, 秦仁杰¹, 邱冬华², 王模³

- (1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114;
2. 杭州市交通规划设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012;
3. 海南省交通工程建设局, 海南 海口 570208)

摘 要:为弥补SBS改性沥青在应用中的不足,该研究从物理性能、布氏旋转黏度、动态剪切流变、弯曲蠕变劲度、微观分析和储存稳定性等方面,探究不同掺量的聚氨酯(PU)/SBS改性沥青性能的变化规律。研究表明:复合改性沥青的三大指标均能得到较好的提升,同时也能增大SBS改性沥青的黏度,改善其高温性能及抵抗车辙的能力,但对低温性能的提升不显著。通过对比分析,推荐的最佳掺量为4%SBS+6%PU。

关键词:道路工程;复合改性沥青;流变性能;聚氨酯;微观结构

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

Study on road performance of PU compound SBS modified asphalt

QIU Chao¹, QIN Renjie¹, QIU Donghua², WANG Mo³

- (1. College of Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Hangzhou Institute of Communications Planning Design & Research, Hangzhou 310012, China;
3. Hainan Transportation Engineering Construction Bureau, Haikou 570208, China)

Abstract: In order to make up for the deficiency of SBS modified asphalt in application. The physical property test, rheological property test and micro analysis of PU / SBS modified asphalt with different content were carried out to explore the change law of composite modified asphalt. The results show that the three indexes of composite modified asphalt could be improved, the viscosity of SBS modified asphalt also would be increased, and enhanced the rutting resistance and high temperature stability of asphalt, but the improvement of low temperature performance was not significant. Through comparative analysis, the optimum content was 4% SBS + 6% PU.

Key words: road engineering; composite modified asphalt; rheological properties; polyurethane; microstructure

作为路面黏结剂的沥青具有良好的黏弹特性,但未经改性的沥青的耐高低温性能较差^[1]。嵌段共聚物可以有效地改善沥青的耐高低温性能,且其对沥青的各种指标的改善都很均衡^[2-4]。与基质沥青相比,苯乙烯-丁二烯-苯乙烯三嵌段共聚物(styrene butadiene styrene triblock copolymer, SBS)改

性沥青的黏度和抗车辙因子更大^[5],因此SBS改性剂在道路改性沥青领域的应用广泛^[6]。但是,由于SBS改性剂和沥青的分子结构有差异,没有能与沥青分子链发生反应的活性基团,不能形成稳固的交联结构,仅在沥青基体中混合均匀,因此两者在该体系中的相容性一般^[7-8],在高温和静态储存过程

收稿日期:2022-01-22

基金项目:长沙理工大学科研创新项目(CX2021SS15);海南省交通运输厅科技项目(J-ZX-ZAX-02-2021)

作者简介:邱超(1998—),男,长沙理工大学硕士生。E-mail:qiuchaoa@163.com

中,易发生离析^[7]。含硫类稳定剂可以通过硫化交联,有效改善SBS改性沥青的存储稳定性,但会存在老化现象,且伴随硫化反应产生的弱毒性烟雾会污染环境^[9-10]。而新兴材料聚氨酯(polyurethane,PU)具有环保耐磨、抗老化性、耐高温、低温柔性好、抗撕裂强度高等优点。将其加入沥青中,能够明显提高基质沥青的弹性恢复能力和耐久性^[11-12]。目前已有大量研究表明,聚氨酯改性剂中存在特殊的活性官能团,能与沥青发生化学交联反应,提升沥青分子间的作用力,改善沥青的力学性能指标^[13-15]。尽管大掺量的PU能够明显提升基质沥青的性能,但其成本较高。因此,本研究采用SBS和PU复配制备的复合改性沥青,以减少部分的SBS改性剂掺量,并加入适量的PU,研究PU/SBS改性沥青性能的变化规律。

1 原材料试验研究

1.1 基质沥青和SBS改性剂性能检验

在实验室,采用A级70#基质沥青和中石化公司的线型SBS改性剂来制备SBS改性沥青,其技术指标见表1~2。

表1 A级70#基质沥青技术指标

Table 1 Technical parameters of 70# asphalt

项目	规范要求	检测结果
针入度(25℃,5 s,100 g)/(0.1 mm)	60~80	68
针入度指数	-1.5~1.0	-1.3
软化点/℃	≥46	48.0
60℃动力黏度/(Pa·s)	≥180	201
15℃延度/cm	≥100	>150

表2 SBS改性剂技术指标

Table 2 Technical indicators of SBS modifier

检验项目	技术要求	检测结果
溶剂流动速率/(g·(10 min) ⁻¹)	1.01~3.00	1.45
硬度	≥68	75
撕裂强度/(kN·m ⁻¹)	≥40	55
300%定伸应力/MPa	≥2.0	2.9
扯断伸长率/%	≥700	748
拉伸强度/MPa	≥20	24

1.2 聚氨酯

本研究采用淄博华天化工有限公司提供的H2133A型的聚醚型聚氨酯预聚体作为聚氨酯材料,其主要技术指标见表3。同时,选用与其相匹配的扩链剂4,4'-亚甲基二(2-氯苯胺)(4,4'-methylene-bis(2-chloroaniline),MOCA)进行扩链反应。MOCA为淡黄色颗粒,分子量为267,熔点为100~108℃,固态密度为1.44 g/cm³。

表3 聚氨酯技术指标

Table 3 Technical indicators of polyurethane

项目	指标	检测结果
外观	无色透明液体	无色透明液体
NCO含量/%	3.35±0.20	3.31
凝胶时间/min	6~9	7
硬度	74~77	77
黏度(85℃)/(MPa·s)	-	460
拉伸强度/MPa	-	20
撕裂强度/(kN·m ⁻¹)	-	55
密度/(g·cm ⁻³)	实测	1.08

2 试验方法

2.1 聚氨酯复配SBS(PU/SBS)改性沥青的制备

1) 分别称取质量分数为3%和4%的SBS改性剂,以及2%、4%、6%、8%的PU预聚体和扩链剂等材料。将PU预聚体提前放入80℃的恒温烘箱中预热30 min。

2) 将一定量的基质沥青置于170℃的恒温烘箱中加热,待沥青呈流动状态时从烘箱内取出,称取600 g沥青置于容器内。使用控温装置将沥青温度控制在170℃左右,以便进行后续的剪切试验。

3) 启动高速剪切仪,以4 000 r/min的速度连续剪切50 min,其间分批次加入SBS改性剂。

4) 先确定沥青表面无明显浮粒,再将提前预热的聚氨酯预聚体分多次、缓慢地加入SBS改性沥青中,以3 000 r/min的速度剪切0.5 h。

5) 将事先研磨成粉末状的MOCA(用量为聚氨酯掺量的10%)加入其中,并保持相同的剪切条件,继续剪切20 min。

6) 将剪切完毕的改性沥青置于120℃的恒温烘箱中发育1 h,使PU和沥青反应完全,得到PU/

SBS改性沥青。

2.2 物理性能测试

PU/SBS改性沥青的三大指标测试步骤依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)^[16](以下简称《规程》)进行。

2.3 布氏旋转黏度试验研究

采用布氏黏度计测试改性沥青的表观黏度,步骤如下:

1) 将沥青加热至流体状态,用盛样筒称取10 g的沥青样品,放置于黏度仪恒温容器中,保温约30 min。

2) 将洁净的转子轻放于盛样筒中,保温20 min后进行试验。

3) 选用27号转子,设置转速为50 r/min,分别在135、155、175℃的试验温度下进行测试。待黏度数值保持稳定后,每隔1 min读取1次数据,连续记录3组数据,取这3组数据的平均值为最终结果。

2.4 动态剪切流变试验

采用动态剪切流变仪(dynamic shear rheometer, DSR)对PU/SBS改性沥青的高温流变性能进行分析。在进行温度扫描试验时,将温度扫描区间设置在52~82℃,每隔6℃进行一次线性扫描,底盘厚度设置为25 mm,两平行板之间的间距设置为1 mm。制好的DSR沥青试样在该条件下进行温度扫描试验。

2.5 弯曲蠕变劲度试验

试验的步骤如下:

1) 将沥青加热至流动状态,再倒入试验模具中,放置一段时间,使沥青温度降至室温。

2) 使用热刮刀将高于试模的沥青刮去,再将试模进行低温水浴处理,之后进行脱模。

3) 将沥青试样放置在弯曲流变仪中,恒温保持60 min后,记录改性沥青在60 s时的蠕变劲度模量 S 值和蠕变速率 m 值。

2.6 微观分析

不同的分子键会产生不同的吸收峰。通过加入改性剂,可以对比加入改性剂前后的吸收峰,从而判断沥青在改性过程中发生的物理化学反应^[17-18]。采用红外光谱仪进行试验,波长测试范围为500~4 000 cm^{-1} 。为了观察PU在SBS改性沥青基体中的分散形态,采用荧光显微镜进行荧光扫描试验,获得荧光显微图像来分析改性沥青的微观形貌。

2.7 储存稳定性分析

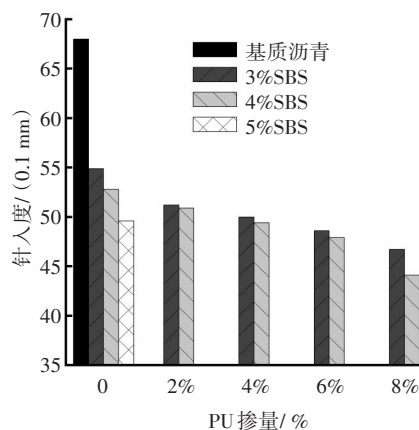
按照《规程》中的步骤进行沥青储存稳定性试验,将沥青在高温状态下放置48 h,然后测试并记录其软化点差值 ΔS ^[6]。

3 试验结果与讨论

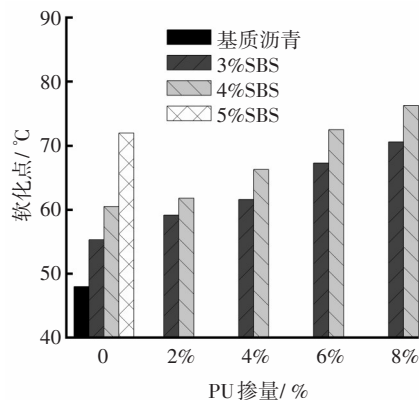
3.1 聚氨酯复配SBS改性沥青的物理性能

按照《规程》的有关规定,对3%SBS和4%SBS改性沥青分别添加不同剂量的PU,测试针入度、软化点及延度三大指标,结果如图1所示。

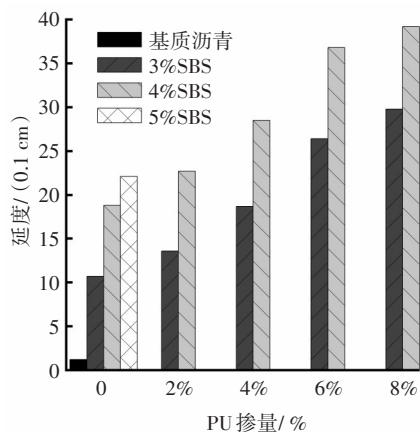
从图1可以看出,加入聚氨酯可以改善沥青的三项性能,特别是延度这一指标。对于4%SBS+4%PU组合,其针入度与5%SBS改性沥青的相当,延度值相比5%改性沥青的也有较大提升,但其软化点与5%改性沥青的相比有所区别。而4%SBS+6%PU组合的软化点可以与5%SBS改性沥青的相当。因此,可以初步得出结论,将PU与SBS复掺可以在减小SBS用量的同时,达到较好的改性效果。



(a) 对针入度的影响



(b) 对软化点的影响



(c) 对延度的影响

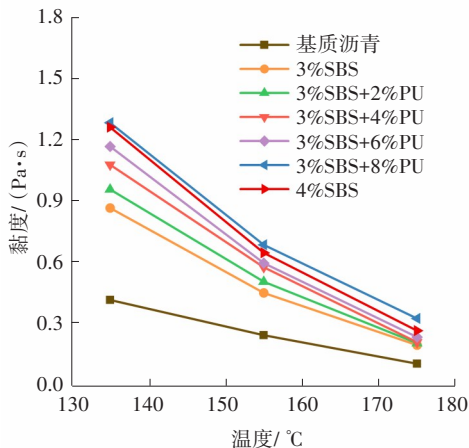
图1 PU含量对PU/SBS改性沥青3大指标的影响

Fig. 1 Influence of PU content on three indicators for PU/SBS modified asphalt

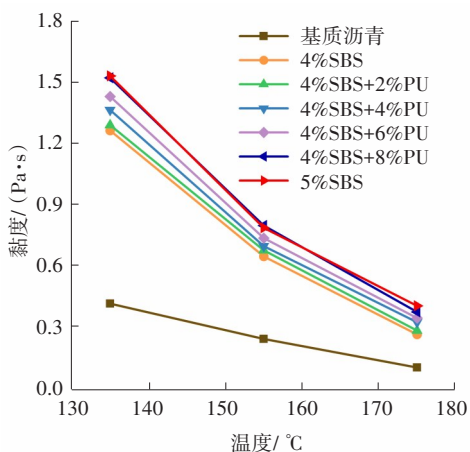
3.2 聚氨酯复配SBS改性沥青的黏性性能

沥青是一种典型的黏弹性材料,经过高温和长期荷载作用,会具有很强的黏性流特性^[19]。在一定黏度值范围内,沥青的黏度越大,表示沥青高温抗变形能力越好,不易发生剪切变形。因此,选择表观黏度指标来反映沥青的黏性性能。布氏旋转黏度仪所测得沥青黏度的试验结果如图2所示。

从图2中可以看出,所有测试的改性沥青在135℃时的黏度都小于3.0 Pa·s,符合美国战略公路研究计划(strategic highway research program, SHRP)的沥青胶结料性能规范,这表明所制备的改性沥青的施工和易性良好。在同一测试温度下,添加了改性剂沥青的相比于基质沥青的黏度提升效果更明显,沥青的抗剪切变形能力和弹性恢复能力也得到了显著的增强。



(a) 3%SBS组黏度的变化



(b) 4%SBS组黏度的变化

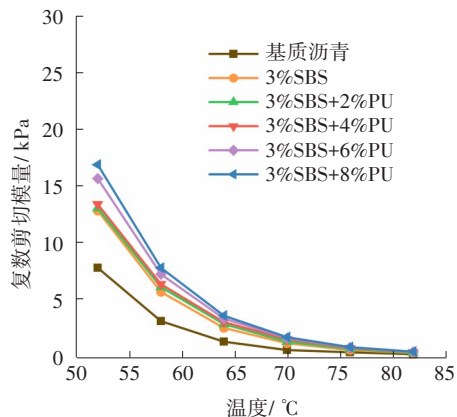
图2 温度对PU/SBS改性沥青黏度的影响

Fig. 2 Influence of temperature on viscosity of PU/SBS modified asphalt

从图2又可以看出,在3%SBS组和4%SBS组的黏温曲线斜率都没有明显的变化,这表明PU的加入能使改性沥青的黏性性能趋于稳定。而且3%SBS+8%PU复合改性沥青的黏度相比于4%SBS改性沥青的略大,4%SBS+8%PU复合改性沥青的黏度也与5%SBS改性沥青的相当。这表明PU的加入对沥青黏度有所提升,且在试验范围内,PU掺量越大,提升效果越明显。

3.3 聚氨酯复配SBS改性沥青的高温稳定性能

为了评价沥青的高温流变性能,对各掺量组合沥青进行了动态剪切流变试验(Dynamic shear rheological test, DSR)^[20-21],并通过 RSpace 软件计算得到了沥青的复数剪切模量 G^* 、相位角 δ 以及车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 。试验结果分别如图3~4所示。

(a) 3%SBS组复数剪切模量 G^* 的变化

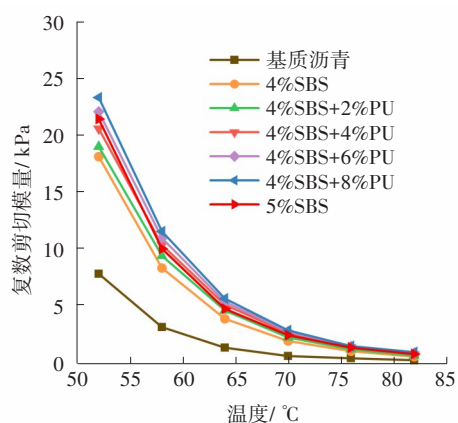
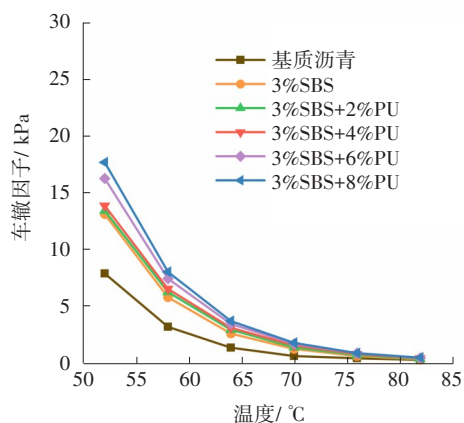
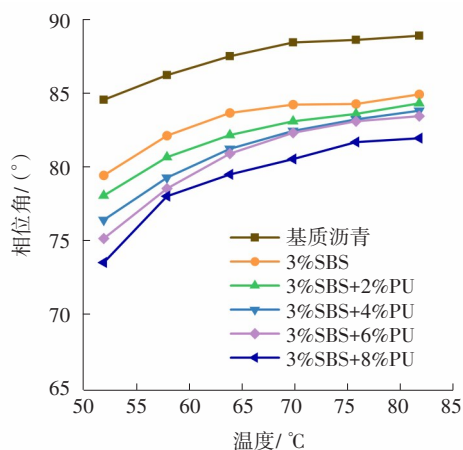
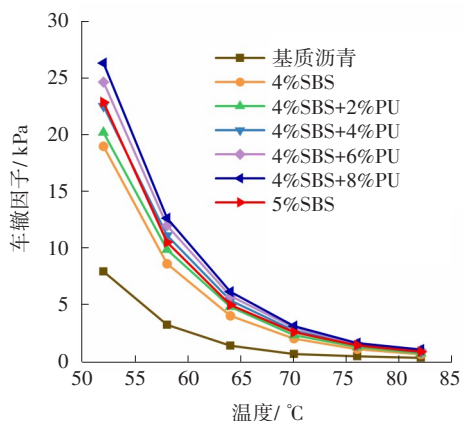
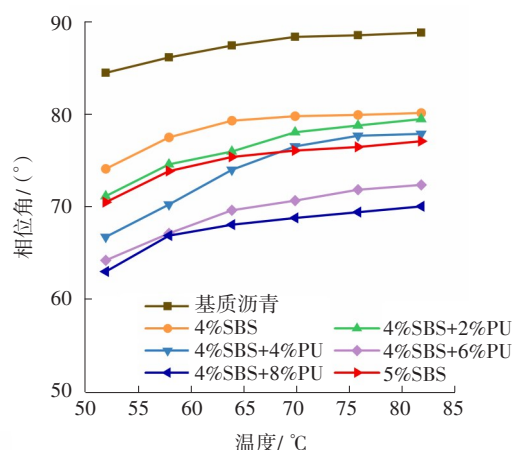
(b) 4%SBS组复数剪切模量 G^* 的变化(a) 3%SBS组车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 的变化(c) 3%SBS组相位角 δ 的变化(b) 4%SBS组车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 的变化(d) 4%SBS组相位角 δ 的变化

图3 温度对PU/SBS改性沥青流变参数的影响

Fig. 3 Influence of temperature on rheological parameters for PU/SBS modified asphalt

图4 PU/SBS改性沥青车辙因子随温度的变化

Fig. 4 Variation of rutting factor with temperature on PU/SBS modified asphalt

从图3~4可以看出,随着温度的升高,沥青的复数剪切模量降低,相位角增大,这表明沥青由高弹状态转变为黏性流动状态。同时,随着PU掺量的增加,改性沥青的车辙因子也会得到不同程度的提高。当掺加4%SBS+4%PU时,沥青的车辙因子已经与单掺5%SBS的相当;而当掺加4%SBS+6%PU时,沥青的车辙因子明显大于单掺5%SBS的。这表明,加入PU可以显著提高沥青胶结料的车辙因子,对沥青的抗车辙能力有很好的促进作用。并且在试验范围内,PU掺量越大,对沥青的高温性能的提升效果越好。

3.4 聚氨酯复配SBS改性沥青的低温抗裂性能

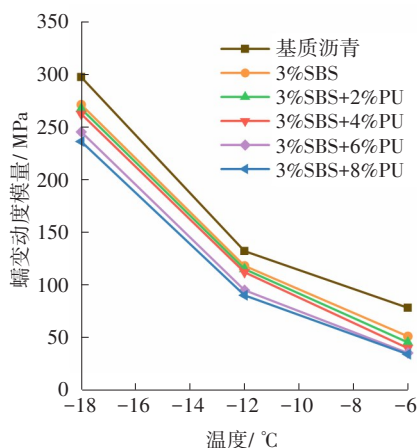
在弯曲梁流变试验(bending beam rheological, BBR)过程中,对沥青小梁施加 $980 \text{ mN} \pm 50 \text{ mN}$ 的荷载,并持续 240 s。同时,记录荷载的大小和沥青小

梁的变形量,并计算出 S 和 m 的值。试验结果如图5所示。

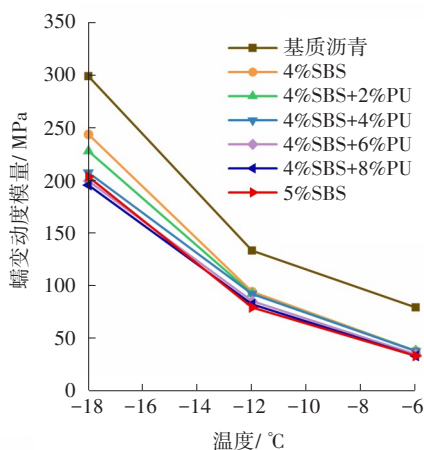
从图5可以看出,随着温度的降低,改性沥青的 S 值减小幅度的增大, m 值增大幅度减小,表示应力松弛能力逐渐变差。掺入的SBS和PU可以增强基质沥青的韧性。当增大SBS和PU改性剂的掺量后,改性沥青的 S 值变小, m 值变大。这表明在试验掺量范围内,加大掺量可以增强沥青抵抗低温开裂的性能。3%SBS+8%PU的掺量组合与4%SBS改性沥青 S 值和的 m 值相当,但其提升效果仍然很小。

相比之下,4%SBS+6%PU和4%SBS+8%PU改性沥青则与5%SBS具有相当的 S 值和 m 值,且它们对沥青低温性能的改善效果也相当。而其他掺量组合改性沥青在 -18°C 时均不能满足 $m>0.3$ 的要求。

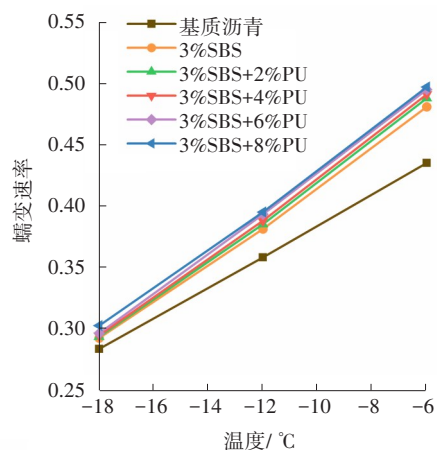
因此,推荐PU/SBS改性沥青的最佳掺量组合是4%SBS+6%PU。



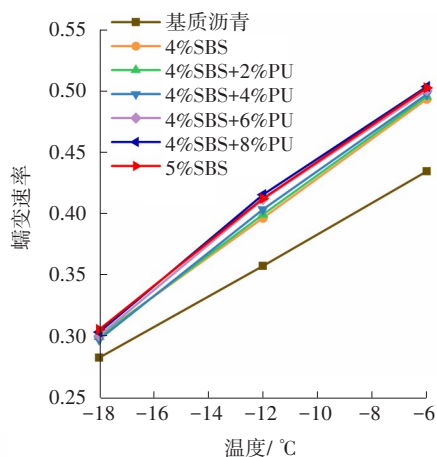
(a) 3%SBS组蠕变劲度模量 S 的变化



(b) 4%SBS组蠕变劲度模量 S 的变化



(c) 3%SBS组蠕变速率 m 的变化



(d) 4%SBS组蠕变速率 m 的变化

图5 温度对PU/SBS改性沥青 S 值和 m 值的影响

Fig. 5 Influence of temperature on s and m for PU/SBS modified asphalt

3.5 聚氨酯复配SBS改性沥青的微观分析

3.5.1 聚氨酯复配SBS改性沥青的红外光谱分析

经过对PU/SBS改性沥青的各项性能研究,选出了最佳的掺量组合,即4%SBS+6%PU改性沥青。为了进一步分析这种改性沥青的性能,对其进行了红外光谱分析,得到红外光谱图像数据,如图6所示。通过对比加入改性剂前后的沥青光谱峰值,可以判断沥青改性过程中发生的物理化学反应^[17]。

从图6可以看出,相比于基质沥青,SBS改性沥青的峰值强度弱,但并未有明显的峰值差异。这表明SBS改性沥青的光谱是SBS聚合物与基质沥青二者光谱的简单叠加^[22],并未发生化学变化。相比之下,PU/SBS改性沥青在单掺SBS的基础上,出现了有几点峰值强度的变化。在波长为 1729.48 cm^{-1} 处,观察酯羰基 $\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动;在 1535.66 cm^{-1} 处的峰值变化是酰胺Ⅱ带 $\text{N}-\text{H}$ 弯曲振动和 $\text{C}-\text{N}$ 伸缩

振动的共同特征峰;在 $1\,312.02\text{ cm}^{-1}$ 处的峰值变化是酰胺Ⅲ带 C—N 伸缩振动和 N—H 弯曲振动的共同特征峰;在 $1\,222.57\text{ cm}^{-1}$ 处,观察到酯基 C—O 伸缩振动的特征峰。PU 中,异氰酸酯基团(—NCO)本应在 $2\,270\text{ cm}^{-1}$ 左右处的特征峰未观察到。由此可推测,PU 中异氰酸酯基团(—NCO)与沥青体系中的—OH 基团反应生成了氨基甲酸酯基团(—NHCOO—)^[23]。在 $1\,677.3\text{ cm}^{-1}$ 左右处,观察到归属于脲基中 C=O 伸缩振动的特征峰,这可能是 PU 中的异氰酸酯基团(—NCO)与体系中的—NH 等基团反应的结果^[24]。在 $1\,103.29\text{ cm}^{-1}$ 处,观测 PU 中醚键 C—O—C 的伸缩振动,该官能团可以增强大分子的柔顺性,提升整体的低温性能。这表明 PU 改性剂在沥青中有化学反应,并且可以提升复合改性沥青的性能。

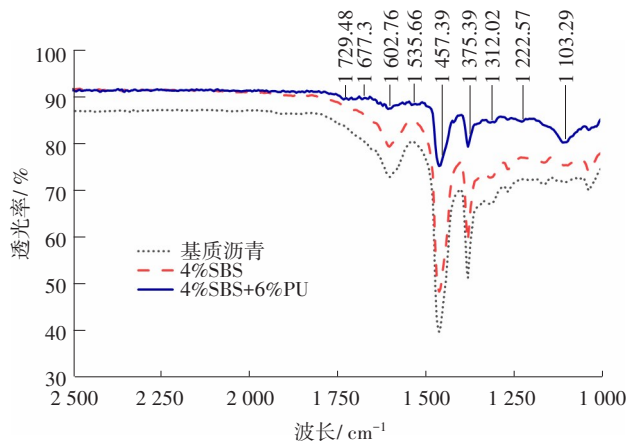
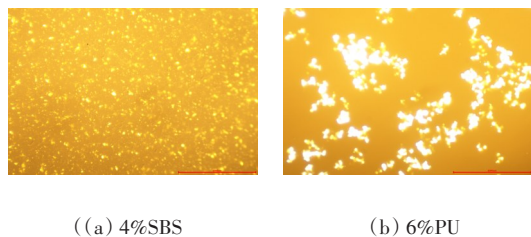


图6 PU/SBS 改性沥青的红外光谱曲线

Fig. 6 FTIR curves of PU/SBS modified asphalt

3.5.2 聚氨酯复配 SBS 改性沥青的微观结构

由于沥青和改性剂自身的分子结构存在差异,因此,在荧光显微镜的红光激发下,会呈现出明暗不同的图像,从而可以辨认出改性剂的种类。为了研究这种差异,选取 4% SBS、6% PU 和 4% SBS+6% PU 的沥青作为研究对象,并制备了相应的沥青试样进行荧光扫描试验。在本次试验中,荧光显微镜的放大倍数为 40 倍,得到的荧光图像如图 7 所示。



(c) 4% SBS+6% PU

图7 PU/SBS 改性沥青的荧光显微镜图像

Fig. 7 Fluorescence microscope image of PU / SBS modified asphalt

从图 7 可以看出, SBS 能够均匀分散、悬浮在沥青相体系中^[25],而 PU 也能够基本均匀分散在沥青相体系中。但由于 PU 为液态,在制备过程中处于高温状态下,容易发生固化,产生团聚现象。相比之下,4% SBS+6% PU 改性沥青的荧光图像显示其改性剂的分布较单一,改性剂更为均匀紧密。掺入的 PU 可以与沥青发生物理化学反应,在沥青的化学结构中形成更加稳定的网状结构^[26-28],从而起到“框架”的作用,约束沥青分子间的相对位移,限制沥青的流动变形。而均匀分散在沥青体系中的 SBS 则如同增强的颗粒,镶嵌在聚氨酯-沥青体系中,使整个沥青体系形成相对稳定的结构,增强了沥青抵抗剪切变形的能力。

3.6 聚氨酯复配 SBS 改性沥青的储存稳定性

选取最优组合 4% SBS+6% PU 进行试验,并以 4% SBS、5% SBS、6% PU 掺量改性沥青作为对照组。结果如图 8 所示。

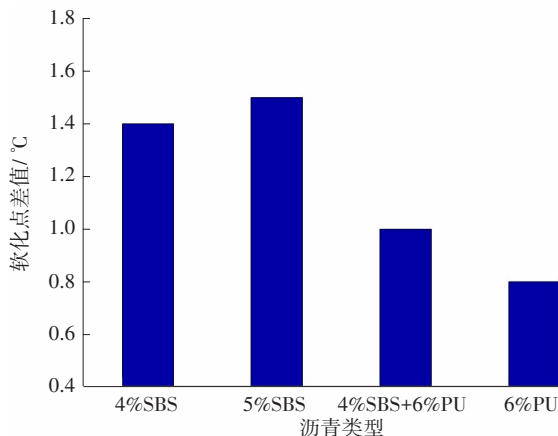


图8 改性沥青软化点差值

Fig. 8 Softening point differences of modified asphalt

从图 8 可以看出,5% SBS 改性沥青的软化点差值要大于 4% SBS 改性沥青的,这表明改性剂掺量越

大,储存稳定性越差。相比之下,6%PU改性沥青的软化点差值明显小于SBS改性沥青的。经过复合改性后的沥青软化点差值与SBS改性沥青的相比,有了明显的降低。这表明PU的加入能够有效地缓解SBS改性沥青的离析问题。

4 结论

通过对不同试验的结果进行分析,可以得到以下结论:

1) PU/SBS改性沥青的三大指标结果显示,加入PU能够降低SBS改性沥青的针入度,提高沥青的软化点,同时能提升沥青的延度,对沥青的高低温性能均有较好的改性效果。这表明4%PU的加入能够取代1%SBS改性剂,使之达到同样的改性效果。

2) 布氏旋转黏度试验表明,掺加PU可以提升SBS改性沥青的黏度。在试验范围内,PU掺量越大,提升效果越明显,8%PU的掺入与1%SBS的掺入对沥青黏度的提升效果相当。

3) 动态剪切试验表明,PU的掺入可以增大SBS改性沥青的复数剪切模量 G^* ,减小其相位角 δ ,从而提高了其车辙因子。当4%SBS改性沥青掺加4%PU时,其车辙因子与单掺5%SBS相当。这表明PU的加入提升了沥青的抗车辙性能和高温稳定性。

4) 低温弯曲梁流变试验表明,在试验范围内,PU掺量的递增对3%SBS改性沥青的低温性能提升明显,但很难满足性能要求;而6%~8%PU的掺入对4%SBS改性沥青所产生的效果相当,均能比入5%SBS改性沥青。因此,推荐最佳掺量为4%SBS+6%PU。

5) 通过傅里叶红外光谱和荧光显微镜进行的微观分析发现,SBS与PU这两种改性剂可以交联在一起,并在沥青体系中分布均匀。整个沥青体系中存在物理改性和化学改性,且具有优异的储存稳定性。

5 展望

1) 拟在后期对PU/SBS改性沥青进行老化试验,制备改性沥青混合料,以研究老化之后复合改性沥青的性能。通过进一步研究复合改性沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性,将进

一步研究PU/SBS改性沥青混合料的路用性能。

2) 目前,聚氨酯改性沥青仍在研究阶段,尚未能形成一套科学的评价体系,并且对其施工工艺的研究也比较少。因此,实际的路用推广存在一定难度。未来,可以从评价指标和施工工艺入手,确定一套完整的评价体系。

3) 近年来,社会上存在大量的聚氨酯废弃物,可以探讨将其加入沥青中进行回收利用,以在改善沥青性能的同时,降低SBS用量,从而减少工程造价。

参考文献(References):

- [1] 张帅,华煜煜,张健.有机化蒙脱土的制备及对沥青改性的研究[J].公路与汽运,2019(2):88-92. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2019.02.024.
ZHANG Shuai, HUA Manyu, ZHANG Jian. Preparation of organic montmorillonite and study on modification of asphalt[J]. Highways & Automotive Applications, 2019(2): 88-92. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2019.02.024.
- [2] ABTAHI S M, SHEIKHZADEH M, HEJAZI S M. Fiber-reinforced asphalt-concrete - A review [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(6): 871-877. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.11.009.
- [3] 刘志航,姜蔚,汪林,等.石墨烯对SBS改性沥青流变性能的影响研究[J].公路,2022,67(4):76-82.
LIU Zhihang, JIANG Wei, WANG Lin, et al. Effect of graphene on rheological properties of SBS modified bitumen[J]. Highway, 2022, 67(4): 76-82.
- [4] 黄卫东,高杰,郝庚任,等.高黏SBS改性沥青的流变性能与化学特性[J].建筑材料学报,2021,24(5):1024-1031,1038.
HUANG Weidong, GAO Jie, HAO Gengren, et al. Rheological properties and chemical properties of high viscosity SBS modified asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(5): 1024-1031, 1038.
- [5] 陈四来,延西利,李鹏,等.沥青和沥青胶浆的黏弹性特性[J].交通科学与工程,2019,35(3):12-17. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2019.03.003.
CHEN Silai, YAN Xili, LI Peng, et al. Viscoelastic properties of bitumen and bituminous mastics[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(3): 12-17. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2019.03.003.
- [6] 甘新立,张文利,李杰,等.基于表面能理论的SBS改

- 性剂掺量对沥青与集料黏附性影响研究[J]. 公路, 2022, 67(10): 357-361.
- GAN Xinli, ZHANG Wenli, LI Jie, et al. Research on the effect of SBS modifier content on the adhesion between asphalt and aggregate based on surface energy theory[J]. Highway, 2022, 67(10): 357-361.
- [7] 徐国其, 翟博超, 胡力群, 等. 高黏度改性沥青储存稳定性试验研究[J]. 公路, 2019, 64(7): 246-251.
- XU Guoqi, ZHAI Bochao, HU Liqun, et al. Tests and studies on storage stability of high viscosity modified asphalt[J]. Highway, 2019, 64(7): 246-251.
- [8] 冯新军. SBS 聚合物改性沥青热储存稳定性研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.
- FENG Xinjun. Study on thermal storage stability of SBS polymer modified asphalt [D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.
- [9] 李颖, 孔超, 朱洪志, 等. 环保高效型 SBS 改性沥青稳定剂路用性能研究[J]. 工程建设与设计, 2021(19): 155-157. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2021.10.044.
- LI Ying, KONG Chao, ZHU Hongzhi, et al. Pavement performance of environmentally friendly and efficient SBS modified asphalt stabilizer [J]. Construction & Design for Engineering, 2021 (19) : 155-157. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2021.10.044.
- [10] 宋宽彬, 王笑风, 褚付克, 等. 基于正交试验的胶粉改性沥青配方优化[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(4): 14-19. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.04.014.
- SONG Kuanbin, WANG Xiaofeng, CHU Fuke, et al. Formulation optimization of crump rubber modified asphalt based on orthogonal test[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(4) : 14-19. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.04.014.
- [11] 金鑫, 郭乃胜, 尤占平, 等. 聚氨酯改性沥青研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2019, 33(21): 3686-3694. DOI: 10.11896/cldb.18090011.
- JIN Xin, GUO Naisheng, YOU Zhanping, et al. Research and development trends of polyurethane modified asphalt[J]. Materials Reports, 2019, 33(21) : 3686-3694. DOI: 10.11896/cldb.18090011.
- [12] YANG F, CONG L, LI Z L, et al. Study on preparation and performance of a thermosetting polyurethane modified asphalt binder for bridge deck pavements [J]. Construction and Building Materials, 2022, 3266: 126784. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126784.
- [13] 郭桂宏, 丛林, 杨帆, 等. 聚氨酯材料在路面工程中的应用进展[J]. 公路交通科技, 2020, 37(6) : 1-10. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.06.001.
- GUO Guihong, CONG Lin, YANG Fan, et al. Application progress of polyurethane material in pavement engineering [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(6) : 1-10. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.06.001.
- [14] LI K N, YAN X L, AI T, et al. Study on properties and application of chloroprene rubber/polyurethane modified asphalt sealant[J]. Construction and Building Materials, 2023, 406: 133177. DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2023. 133177.
- [15] SUN M, JING S, WU H B, et al. Preparation scheme optimization of thermosetting polyurethane modified Asphalt. [J]. Polymers, 2023, 15 (10)) : 2327. DOI: 10.3390/polym15102327.
- [16] 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.
- Research Institute of Highway Ministry of transport. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering : JTG E20—2011[S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [17] 毕飞, 樊亮, 李永振, 等. 傅里叶红外光谱技术在沥青材料中的应用研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2021, 50 (1) : 108-114, 150. DOI: 10.16584/j. cnki. issn1671-5381.2021.01.035.
- BI Fei, FAN Liang, LI Yongzhen, et al. Research progress of fourier infrared spectroscopy in asphalt materials[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2021, 50 (1) : 108-114, 150. DOI: 10.16584/j. cnki. issn1671-5381.2021.01.035.
- [18] 王鑫洋, 王宗宝, 汲平. 基于红外光谱的改性沥青 SBS 含量检测的可靠性分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(6): 87-90.
- WANG Xinyang, WANG Zongbao, JI Ping, et al. Reliability analysis of SBS content detection in modified asphalt based on infrared spectroscopy [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 15(6): 87-90.
- [19] 罗浩原, 欧阳铨霏, 徐加秋, 等. 一种 SBS 改性沥青黏

- 度测试新方法:旋转平板黏度法[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(3): 724-732. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2020.03.034.
- LUO Haoyuan, OUYANG Chengfei, XU Jiaqiu, et al. A new method to measure viscosity of SBS modified asphalt: rotational plate viscosity test [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(3): 724-732. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2020.03.034.
- [20] 李立顶, 马桂荣, 程永春等. 基于DSR试验的硅藻土/玄武岩纤维复合改性沥青性能研究[J]. 材料导报, 2018, 32(增刊2): 484-488.
- LI Liding, MA Guirong, CHENG Yongchun, et al. Study on performance of diatomite and basalt fiber compound modified asphalt based on DSR test [J]. Materials Review, 2018, 32(sup 2): 484-488.
- [21] 付海英, 谢雷东, 虞鸣, 等. SBS改性沥青动态剪切流变性能评价的研究[J]. 公路交通科技, 2005(12): 9-12.
- FU Haiying, XIE Leidong, YUMing, et al. Dynamic shear rheologic properties of SBS-G-M modified asphalt [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005(12): 9-12.
- [22] 曹嘉琦, 王志祥. SBS改性剂老化对改性沥青性能的影响[J]. 合成材料老化与应用, 2021, 50(5): 27-31, 89. DOI: 10.16584/j.cnki.issn1671-5381.2021.05.009.
- CAO Jiaqi, WANG Zhixiang. Effect of aging of SBS modifier on properties of SBS modified asphalt [J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2021, 50(5): 27-31, 89. DOI: 10.16584/j. cnki. issn1671-5381.2021.05.009.
- [23] 李添帅, 陆国阳, 梁栋, 等. 聚氨酯前驱体基化学改性沥青及其改性机理[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 45-59. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.10.004.
- LI Tianshuai, LU Guoyang, LIANG Dong, et al. Polyurethane-precursor-based chemically modified asphalt and its modification mechanism [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(10): 45-59. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.10.004.
- [24] 金鑫, 郭乃胜, 闫思檬, 等. 聚氨酯复合改性沥青的制备与性能研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(3): 80-94. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.03.004.
- JIN Xin, GUO Naisheng, YAN Simeng, et al. Preparation and performance evaluation on polyurethane composite modified asphalt [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(3): 80-94. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.03.004.
- [25] HOLLERAN G, MACCARRONE S. Properties of polymer modified binders and relationships to mix and pavement performance [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1997, 64: 951-957.
- [26] 祁冰. 适用于桥面铺装的聚氨酯(PU)改性沥青及混合料性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- QI Bing. Research on properties of polyurethane (PU) modified asphalt and mixture for deck pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [27] 向丽. 废橡胶粉/SBS复合改性沥青的机理和性能研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2011.
- XIANG Li. Mechanism and performance investigation of crumb rubber/SBS composite modified asphalt binder [D]. Qingdao: China University of petroleum, 2011.
- [28] 王俊岩. 聚合物改性沥青在热储存及运输过程中的降解研究[D]. 西安: 长安大学, 2020. DOI: 10.26976/d.cnki.gchau.2020.002094.
- WANG Junyan. Study on degradation of polymer modified asphalt binders during thermal storage and transportation [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- (责任编辑:罗容;校对:李脉;英文编辑:郭一鹏)