

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220523001

文章编号: 1672-9331(2023)06-0100-09

引用格式: 张映雪, 朱文静, 邱冬华, 等. SBS/PU复合改性沥青混合料性能试验研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(6): 100-108.

Citation: ZHANG Yingxue, ZHU Wenjing, QIU Donghua, et al. Experimental study on performance of SBS/PU composite modified asphalt mixture[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(6): 100-108

SBS/PU复合改性沥青混合料性能试验研究

张映雪¹, 朱文静¹, 邱冬华², 张浩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 570100)

摘要:【目的】研究苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(styrene-butadiene-styrene block copolymer, SBS)与聚氨酯(polyurethane, PU)复合改性沥青混合料的路用性能。【方法】采用2.0% SBS与不同掺量(4.0%、6.0%、8.0%)的PU制备复合改性沥青, 并使用这种改性沥青制备密级配沥青混合料AC-13, 通过开展马歇尔试验、车辙试验、低温弯曲蠕变试验评价沥青混合料的高温抗车辙、低温抗裂、水稳定性, 同时制备4.0% SBS改性沥青混合料和6.0% PU改性沥青混合料作为对照组。【结果】SBS/PU复合改性沥青混合料能够满足沥青路面的路用性能要求。其中, 2.0% SBS+6.0% PU复合改性沥青混合料的动稳定度较基质沥青混合料、4.0% SBS改性沥青混合料、6.0% PU改性沥青混合料的分别提升144%、19%、52%, SBS/PU复合改性沥青混合料的高温稳定性较对照组有所提升, 水稳定性与对照组相当, 低温性能的改善效果不明显。【结论】综合考虑改性效果和经济性, SBS/PU复合改性沥青混合料的最佳掺量为2.0% SBS+6.0% PU。

关键词: 改性沥青; 苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS); 聚氨酯(PU); 复合改性; 路用性能

中图分类号: U414

文献标志码: A

0 引言

近年来, 由于交通的快速发展, 重载车辆的比例越来越高, 单一改性沥青常常无法满足沥青路面使用性能的要求, 而两种或多种聚合物复合改性沥青具有明显的性能优势, 在未来道路行业中具有广阔的应用前景^[1]。苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(styrene-butadiene-styrene block copolymer, SBS)可以同时改善沥青的高低温性能并能兼顾其他性能指标, 在改性沥青领域得到迅速发展^[2]。由于SBS改性剂缺乏与沥青分子链发生反应的活性基团, 因此其在高温和静态储存过程中易发生离析^[3]。为弥补该聚合物改性剂存在的缺陷, 众多学者开始探索更加有效的化学改性方法。

相关研究表明, 聚氨酯(polyurethane, PU)改性沥青具有环保、成本低的优点, 且能与沥青发生

化学反应形成稳定的交联体系结构^[4]。SMITH等^[5]采用PU预聚体和基质沥青制备PU改性沥青, 并证实其具有优异的物理性能和良好的耐老化性能。BAZMARA等^[6]利用傅里叶红外光谱对PU改性沥青的改性机理进行研究, 发现PU中游离的异氰酸酯基团能够与改性沥青中的羟基发生反应。KHAIRUDDIN等^[7]研究发现PU的加入可以提高基质沥青的硬度和黏度, 进而改善沥青的耐高温性能。孙敏等^[8]研究发现加入30.0% PU对沥青性能的改善效果要优于加入4.0% SBS的改善效果。

目前, 相关研究中使用的PU材料多为固态, 存在不易分散、掺量较多等不足^[9]。为充分发挥不同改性剂的改性优势, 本文在国内外研究的基础上, 提出以SBS/PU复配制备复合改性沥青, 系统地研究SBS/PU复合改性沥青混合料的路用性能, 并与掺入单一SBS或PU的改性沥青混合料的性能进行对比。同时, 在综合考虑改性效果和经济

收稿日期: 2022-05-23; 修回日期: 2022-05-30; 接受日期: 2022-05-31

基金项目: 长沙理工大学科研创新项目(CX2021SS15); 安徽省自然科学基金资助项目(1908085QE217); 海南省交通科技项目(J-ZX-ZAK-02-2021)

通信作者: 张映雪(1970—)(ORCID: 0000-0002-0937-4004), 女, 副教授, 主要从事交通环境工程和道路线形设计方面的研究。E-mail: csczyx@126.com

性的前提下,推荐SBS/PU复合改性沥青的最佳掺量组合。

1 原材料

1.1 沥青

本文沥青选用70#A级基质沥青,SBS改性剂为中国石油化工集团有限公司生产的型号为YH-791H的改性剂,其外观为白色固体颗粒。基质沥青和SBS改性沥青技术指标均满足《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)的相关要求,两种沥青的常规物理性能技术指标分别见表1和表2。

表1 70#基质沥青技术指标

Table 1 Technical parameters of 70# base asphalt

测试项目	试验结果	技术要求
针入度(100 g,5 s,25 °C)/(0.1 mm)	66.9	60 ~ 80
软化点(环球法)/°C	49.1	≥46
延度(5 cm/min,15 °C)/cm	113	>100
动力黏度(60 °C)/(Pa·s)	193	≥180

表2 SBS改性沥青技术指标

Table 2 Technical parameters of SBS modified asphalt

测试项目	试验结果	技术要求
针入度(100 g,5 s,25 °C)/(0.1 mm)	59.1	40 ~ 60
软化点(环球法)/°C	80.9	≥60
延度(5 cm/min,15 °C)/cm	26.2	≥20
运动黏度(135 °C)/(Pa·s)	1.24	≤3

1.2 聚氨酯(PU)

本次研究所用的PU是由淄博华天化工有限公司提供的H2133A型的聚醚型PU预聚体,其技术指标见表3。

表3 聚氨酯技术指标

Table 3 Technical parameters of polyurethane

项目	检测典型值
外观	无色透明液体
异氰酸酯基团(NCO)纯度/%	3.32
黏度(85 °C)/(MPa·s)	459
拉伸强度/MPa	20
密度/(g·cm ⁻³)	1.08
撕裂强度/(KN·m ⁻¹)	54

1.3 扩链剂

一般而言,当两种物质的分子量相差很大时,其相容性较差。PU预聚体的分子量要远远小于基质沥青的分子量,因此将PU加入沥青中会造成整体的相容性不佳^[10]。而扩链剂能够与PU分子

链中的硬链段发生交联反应,增大PU的分子量,使PU的分子量与沥青的相近,从而改善两者的相容性^[11]。扩链剂掺量的多少会使其与预聚体发生不同的化学反应,从而影响其扩链交联的效果。因此,需要精确地控制扩链剂的用量。预聚体中3,3'-二氯-4,4'-二氨基二苯甲烷(MOCA)的掺量计算公式如式1所示:

$$M_0 = M_1 \times \frac{M_m}{84} \times W_n \times f \quad (1)$$

式中: M_0 为扩链剂质量,g; M_1 为PU预聚体质量,g; M_m 为MOCA的相对分子质量; W_n 为PU预聚体中异氰酸酯基团(-NCO)的含量,%; f 为扩链系数(本文选用0.94)。

本文所用的扩链剂MOCA是由淄博华天化工有限公司提供的,且与H2133A型聚醚型PU预聚体相匹配,其分子结构示意图如图1所示。

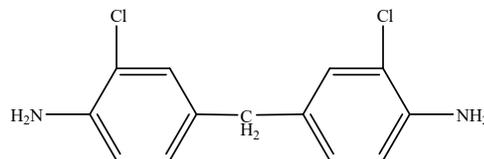


图1 MOCA分子结构图

Fig. 1 Molecular structure diagram of MOCA

1.4 集料

本次试验所用的粗集料采用辉绿岩加工而成,该集料石质坚硬、干燥、不含风化颗粒。细集料选用由石灰岩加工而成的机制砂,矿粉是由田阳王玉矿粉厂生产的石灰岩矿粉。集料及填料性能试验及技术标准分别参照《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)和《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)。各集料技术指标见表4~6。

表4 粗集料技术指标

Table 4 Technical parameters of coarse aggregate

检测项目	规范要求	测试结果	
表观相对密度	[3,5) mm	≥2.60	2.925
	[5,10) mm	≥2.60	2.950
	[10,15) mm	≥2.60	2.950
吸水率/%	[3,5) mm	≤2.0	0.77
	[5,10) mm	≤2.0	0.62
	[10,15) mm	≤2.0	0.40
压碎值/%	≤25	10.6	
磨光值	≥42	58	
粗集料与沥青的黏附等级	≥5	5	
针片状含量/%	[5,10) mm	≤18	7.6
	[10,15) mm	≤18	8.2

表5 细集料技术指标

Table 5 Technical parameters of fine aggregates

检测项目	规范要求	测试结果
表观相对密度	≥2.50	2.934
坚固性(大于0.3 mm部分)/%	≤12	6.2
砂当量/%	≥60	78.5
棱角性/s	≥30	42

表6 矿粉技术指标

Table 6 Technical parameters of mineral powder

检测项目	规范要求	测试结果
外观	无团粒结块	无团粒结块
表观相对密度	≥2.50	2.785
含水率/%	≤1	0.3
不同粒度范围的质 量分数/%	<0.6 mm	100
	<0.15 mm	90~100
	<0.075 mm	75~100
亲水系数	<1	0.6
塑性指数/%	<4	2
加热安定性	实测记录	良好

1.5 改性沥青的制备

1) SBS改性沥青。

称取600 g已加热至170 °C的基质沥青,并倒入反应容器中,控制温度为165~175 °C,并分批多次加入SBS改性剂,使用高速剪切仪在4 000 r/min的剪切速率下连续剪切60 min,使SBS均匀分散于基质沥青中。随后,降低剪切速率至2 500 r/min,并继续剪切30 min,使SBS与沥青充分反应,剪切完成后,将混合物放置于120 °C的恒温烘箱中发育60 min。

2) PU改性沥青。

称取600 g的70#基质沥青置于烘箱中加热融化,在130 °C的温度下对其进行剪切,剪切速率为1 500 r/min。然后,将一定量的扩容剂MOCA加入沥青中,以相同的剪切速率继续剪切30 min。再称取一定量的预热至90 °C的PU预聚体加入沥青中,保持剪切速率和沥青温度不变,继续剪切30 min,即可制得PU改性沥青。

3) SBS/PU复合改性沥青。

通过对国内外相关的研究现状分析可以得知,目前SBS等聚合物多数采用的掺量在4.0%左右^[12]。这一措施能够有效提高沥青在高温时抵抗剪切破坏的能力,改善低温时的柔韧性,但是存在工程造价较高、高掺量时沥青易发生离析、施工不易等问题。因此,本文考虑使用PU部分替代SBS

改性剂,降低SBS的掺量,制备SBS/PU复合改性沥青混合物,并对该混合物性能开展试验研究,探究SBS/PU复合改性沥青的适用性。由于PU预聚体长时间处于高温状态下易发生固化^[13],因此制备SBS/PU复合改性沥青时,需要先制得SBS改性沥青再掺入PU。

本研究参考文献^[14],将600 g的70#基质沥青在烘箱中加热后用高速剪切仪剪切,在温度为170 °C条件下制备SBS/PU复合改性沥青。首先,称取600 g的基质沥青、质量分数为2.0%的SBS改性剂(SBS占基质沥青的比例)、质量分数为4.0%、6.0%、8.0%PU预聚体(PU占基质沥青的比例)、一定质量的扩链剂等材料。启动剪切仪,待其温度稳定在165~170 °C时,以4 000 r/min的剪切速率对基质沥青进行高速剪切。然后,分批加入SBS改性剂,连续剪切50 min,观察表面无明显浮粒后,再将提前预热的一定质量的PU预聚体缓慢加入SBS改性沥青中,控制温度为170 °C,以3 000 r/min的剪切速率剪切30 min,最后将事先研磨成粉末状的MOCA(用量为PU掺量的10.0%)加入沥青中,保持剪切速率和温度不变,继续剪切20 min,制得不同掺量的SBS/PU复合改性沥青。将剪切完毕的SBS/PU复合改性沥青置于120 °C的恒温烘箱中发育1 h,使PU和沥青完全反应,这样可以制得稳定的SBS/PU复合改性沥青。最后,用该复合改性沥青制备SBS/PU复合改性沥青混合物并对其性能进行测试。

1.6 常规性能试验结果与分析

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)的有关测试步骤,分别对PU改性沥青、SBS改性沥青、SBS/PU复合改性沥青的针入度(25 °C)、软化点、延度(5 °C, 5 cm/min)三大指标进行了测试。测试结果见表7。

表7 不同改性沥青主要技术指标

Table 7 Main technical parameters of different modified asphalts

不同改性沥青	针入度 (25 °C)/ 0.1 mm	延度(5 °C, 5 cm/min)/ cm	软化 点/°C
6.0%PU改性	57.1	8.9	54.5
4.0%SBS改性	53.8	18.8	60.5
2.0%SBS+4.0%PU复合改性	51.5	16.3	61.6
2.0%SBS+6.0%PU复合改性	53.7	21.8	62.3
2.0%SBS+8.0%PU复合改性	53.1	22.6	68.2

对于复合改性沥青,其针入度性能相比于单一的PU改性沥青要更为出色,这表明SBS、PU复合改性对沥青的耐热性有显著的改善作用。在一定掺量范围内,随着PU掺量的增大,SBS/PU复合改性沥青的针入度呈先上升后下降的变化趋势,当SBS和PU的掺量分别为2.0%和6.0%时,改性效果最佳。从延度试验结果可知,SBS/PU复合改性沥青的低温塑性较单一改性沥青的更佳。在一定掺量范围内,随着PU掺量的增大,改性效果逐渐增加,这表明PU的加入能够提升沥青的抗开裂性能。这是因为SBS、PU与沥青发生物理化学反应,形成紧密结合的连续体系,减少了应力集中现象,增强了抵抗外力的能力,从而改善了沥青的低温抗开裂性能。SBS与沥青形成均衡的共混体系,而PU的加入在沥青与SBS之间起到了桥梁般的连接作用,形成了一个稳固的网络结构,使SBS/PU复合改性沥青的路用性能更加优异。就软化点而言,SBS/PU复合改性沥青的软化点比单一改性的PU改性沥青和SBS改性沥青的都高。这是因为在温度逐渐升高的过程中,SBS/PU复合改性沥青中SBS改性剂的弹性组分限制了沥青质点的相对移动。同时,SBS、PU与沥青发生的物理化学反应形成了三维交联网状结构,从而显著提升了沥青高温抗变形能力^[15]。试验结果表明,SBS/PU复合改性沥青的高温性能显著提升。

1.7 热存储稳定性分析

为了避免因基质沥青与改性剂两种聚合物分子结构的差异而造成两者相容性较差的问题^[16],根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)的相关要求,本文对不同改性沥青进行离析试验,以研究SBS/PU复合改性沥青的热存储稳定性。

将分别掺入2.0%SBS+4.0%PU、2.0%SBS+6.0%PU、2.0%SBS+8.0%PU改性剂的沥青样品在高温状态下静置48h后,分别测试其上、下部软化点的差值 ΔS 。试验结果见表8。

由表8可知,SBS/PU复合改性沥青随着PU掺量的增加,其软化点差值下降,复合改性沥青的热存储稳定性更好,这表明PU与沥青中的胶质组分发生交联反应,形成了更加稳定的网络结构从而降低了离析的风险。PU的加入能够有效缓解改性沥青的离析问题,从而使SBS/PU复合改性沥青具有较好的相容性。

表8 沥青上、下部软化点差值

Table 8 The difference in the softening points for the upper and lower asphalt

不同改性沥青	上部软化点/ $^{\circ}\text{C}$	下部软化点/ $^{\circ}\text{C}$	差值 $\Delta S/^{\circ}\text{C}$
6%PU改性	54.6	55.4	0.8
4%SBS改性	56.1	57.4	1.3
2%SBS+4%PU复合改性	67.3	68.2	0.9
2%SBS+6%PU复合改性	69.5	70.4	0.9
2%SBS+8%PU复合改性	70.7	71.5	0.8

2 混合料配合比设计

2.1 沥青混合料的级配设计

合适的矿料级配对于混合料的路用性能具有较好的提升作用。一般而言,沥青混合料的级配越密,其空隙率越小,从而可以提供足够的强度并延长沥青路面的疲劳寿命^[17]。根据常用的路面结构,本研究采用不同改性沥青制备密级配沥青混合料AC-13,并对不同改性沥青混合料进行路用性能研究^[18]。该试验依据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)的相关要求,通过调整各档集料的最佳质量百分比,最终计算得到粒径为[10,15)mm的粗集料1#、[5,10)mm的粗集料2#、[3,5)mm的粗集料3#、[0,3)mm的细集料4#、矿粉的掺配比例分别为28.0%、20.0%、18.0%、30.0%、4.0%,并绘制了级配曲线图,如图2所示。

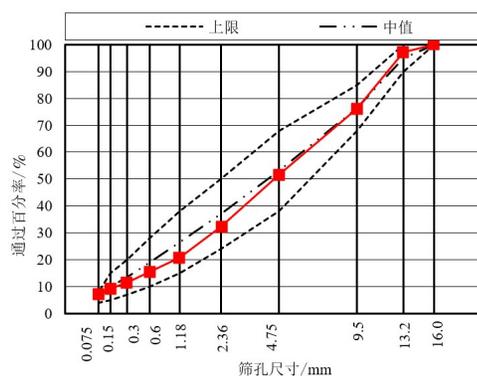


图2 矿料级配曲线图

Fig. 2 Aggregate grading curve

2.2 最佳油石比

选取2.0%SBS+6.0%PU复合改性沥青为研究对象,根据相关工程经验,初步拟定SBS/PU复合改性沥青的最佳油石比为5.0%,以0.3%为间隔变化,制备4.4%、4.7%、5.0%、5.3%、5.6%五种不同油

石比的马歇尔试件,对该试件的物理和力学指标进行测试,试验结果见表9。根据表9中马歇尔试验测得的SBS/PU复合改性沥青混合料相关体积

参数和力学指标,经计算得到不同改性沥青混合料的最佳油石比,见表10。其中,2.0%SBS+6.0%PU复合改性沥青混合料的最佳油石比为5.2%。

表9 沥青混合料马歇尔试验结果

Table 9 Marshall test results of asphalt mixture

油石比/%	最大理论密度/ ($\text{g}\cdot\text{mm}^{-3}$)	毛体积密度/ ($\text{g}\cdot\text{mm}^{-3}$)	空隙率/%	矿料空隙/%	饱和度/%	稳定度/kN	流值/mm
4.3	2.683	2.476	6.5	16.8	61.3	9.82	2.71
4.7	2.655	2.514	5.6	16.2	65.2	10.40	3.12
5.0	2.666	2.549	4.8	15.7	69.3	11.70	3.55
5.3	2.650	2.564	4.2	15.2	72.3	12.34	3.72
5.6	2.642	2.543	3.4	14.5	76.7	11.90	3.88
规范要求			3~6	≥ 14	65~75	≥ 8.0	2~4

表10 不同沥青混合料的最佳油石比

Table 10 Optimum asphalt to aggregate ratio of the mixture

不同沥青混合料	最佳油石比/%
基质沥青混合料	4.7
4.0%SBS改性沥青混合料	5.0
6.0%PU改性沥青混合料	5.5
2.0%SBS+4.0%PU复合改性沥青混合料	5.1
2.0%SBS+6.0%PU复合改性沥青混合料	5.2
2.0%SBS+8.0%PU复合改性沥青混合料	5.2

3 改性沥青混合料性能研究

3.1 高温稳定性

通过车辙试验分析改性沥青混合料的高温性能,验证所制备的改性沥青混合料的高温稳定性的优劣。依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)开展车辙试验。试验结果如图3所示。

通过对车辙试验结果进行分析,可以得到以下结论:SBS、PU的加入能够显著提高基质沥青的动稳定度。其中,6.0%PU改性沥青混合料和4.0%SBS改性沥青混合料的动稳定度比基质沥青混合料的分别提高了49.5%、138.5%。在SBS/PU复合改性沥青混合料中,随着PU掺量的增加,混合料的动稳定度呈先上升后下降的趋势,在掺加2.0%SBS+6.0%PU时,该混合料的动稳定度最大,其高温性能最佳。这表明SBS/PU复合改性沥青混合料的高温性能比SBS或PU单一改性沥青混合料的更为出色。这是因为SBS/PU复合改性沥青所形成的黏聚体中弹性组分有所增加,PU、SBS和沥青间的交联作用使沥青内部形成均匀稳定的

结构,PU和SBS形成了均一质体,使得沥青的聚集得到改变。在沥青(低分子量物质)与PU、SBS等高分子物质混合后,PU、SBS等高分子物质附着在沥青聚合物链上,沥青分子链被束缚,沥青的稳定性得到提升。同时,也验证了SBS/PU复合改性沥青混合料在高温下具有更加良好的抗变形性能。

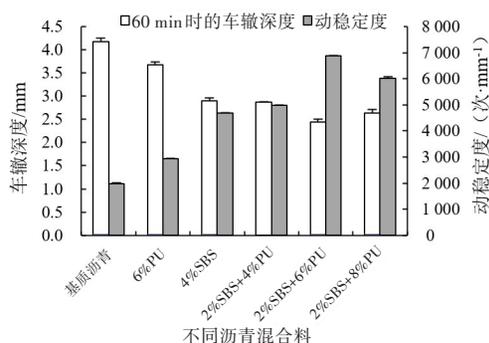


图3 不同沥青混合料的车辙试验结果

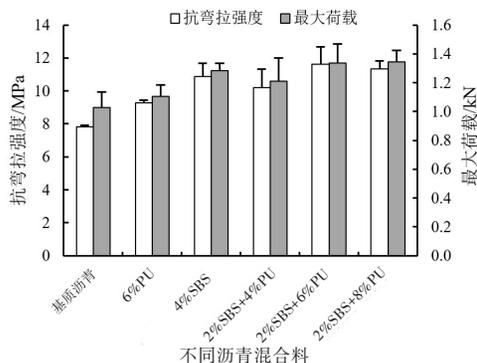
Fig. 3 Rutting test results of different asphalt mixtures

3.2 低温抗裂性

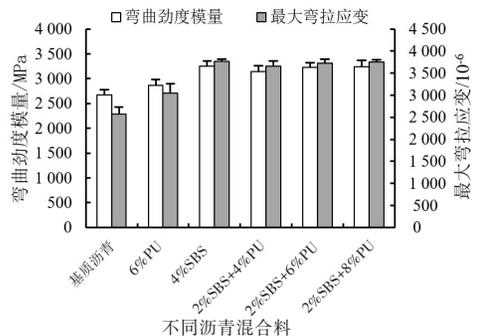
低温弯曲蠕变试验是一种用于评价沥青混合料低温性能的试验方法^[19-22]。本文采用小梁弯曲试验研究不同沥青混合料的低温性能。将制备好的车辙试件用切割机分割成尺寸为250 mm×30 mm×35 mm的小梁试件,试验温度为-10℃,加载速率为50 mm/min。试验结果如图4所示。

通过对小梁弯曲试验结果进行分析,可得到以下结论:以上6种沥青混合料的最大弯拉应变均满足《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中大于 $2\ 500\times 10^{-6}$ 的要求。从最大弯拉应变的试验结果来看,6.0%PU、4.0%SBS改性沥青混合料的最大弯拉应变比基质沥青混合料的分别提高了18.3%、46.1%。这表明SBS、PU的

加入可以降低沥青路面在低温状态时发生开裂的风险,并且 SBS 对沥青混合料低温抗开裂性能的改善效果比 PU 的要好,PU 对沥青路面低温性能的改善效果有限。当 SBS 改性剂掺量为 4.0% 时,沥青中含有大量弹性组分,沥青混合料低温抗变形能力增强。在降低沥青混合料低温开裂的风险方面,掺量为 2.0%SBS+6.0%PU 的 SBS/PU 复合改性沥青混合料的最大弯拉应变与 4.0%SBS 改性沥青混合料的相当。因此,使用 SBS、PU 对沥青进行复合改性,可以改善 SBS/PU 复合改性沥青混合料的低温性能。



(a) 抗弯拉强度和最大荷载试验结果



(b) 弯曲劲度模量和最大弯拉应变试验结果

图 4 小梁弯曲试验结果

Fig. 4 Beam bending test results

3.3 水稳定性

本文将 6 种不同改性沥青混合料按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的相关要求制备马歇尔试件,并根据试验规程分别进行浸水马歇尔试验与冻融劈裂试验,试验结果如图 5 所示。

通过对水稳定性试验结果进行分析,可以得到以下结论:所测试的改性沥青混合料的残留稳定性和冻融劈裂抗拉强度比均满足规范要求(分别大于 85% 和 80%)。相较于基质沥青混合料,掺入 SBS 或 PU 单一改性剂的沥青混合料的残留稳

定度和冻融劈裂抗拉强度比均有所提升,这表明是 SBS、PU 的加入可以有效增强沥青混合料的水稳定性。另外,随着 PU 掺量的增加,SBS/PU 复合改性沥青混合料的残留稳定性和冻融劈裂抗拉强度比也呈现出上升的趋势。

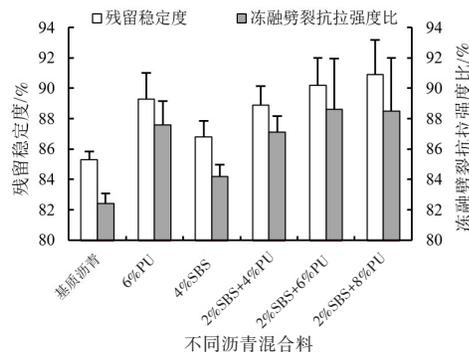


图 5 水稳定性试验结果

Fig. 5 Water stability test results

4 讨论

以往在研究聚合物改性沥青混合料的路用性能时,经常会遇到 SBS 等改性剂在高温储存中发生离析等问题,这些问题制约了研究的进展。为了克服聚合物改性剂的缺陷,研究人员普遍采取同时加入 PU 与 SBS 改性剂,制备 SBS/PU 复合改性沥青,但 SBS、PU 的具体掺量并未明确,通常存在 PU 掺量过高与分散性不足的缺陷。本研究从沥青混合料实际路用性能出发,制备了三组不同掺量的 SBS/PU 复合改性沥青混合料,并与单掺 PU 或 SBS 的改性沥青混合料作对照,通过测试各混合料的高温抗车辙、低温抗裂、水稳定性等指标,检验 SBS/PU 复合改性沥青混合料的路用性能是否满足要求。

根据马歇尔试验、车辙试验以及弯曲蠕变试验的相关分析结果,SBS 与 PU 两种改性剂复掺可以提升沥青混合料的路用性能,且 PU 能代替部分 SBS。本文呈现出来的见解与文献[13-14,16]已有研究成果同中有异。从共同点上来说,PU、SBS 在对沥青混合料的高低温、水稳定等路用性能的改善上具有明显的效果。从差异上看,已有研究为了使沥青混合料的路用性能达到相关规范要求,PU 的掺量往往达到了 30.0%^[4],这导致沥青混合料存在不易分散与经济性问题。另外,掺入 SBS 改性剂虽然满足相关规范要求且掺量适当,但该

混合料在高温和静态储存过程中易发生离析。因此,本文在采用SBS/PU复合改性沥青时,兼顾了改性效果和经济性。最佳掺量的确定缓解了因PU掺量过高引起的分散难的问题,同时降低了工程造价,为SBS/PU复合改性沥青的应用提供了更广阔的前景。

本研究缺乏在微观分子结构层面对聚合物改性沥青机理的分析,未考虑PU原材料的选取标准对改性沥青混合料路用性能的重要性,且已有的评价指标体系仍有待完善之处。下一步可以采用不同品质的PU做更具体的分析研究,增加红外光谱等微观层面的分析研究,以期更全面地表征SBS/PU改性沥青混合料的路用性能,

5 结论

本文对SBS/PU复合改性沥青混合料的高温、低温、水稳定性等路用性能进行评价,主要结论如下:

1) 2.0%SBS+6.0%PU复合改性沥青混合料的动稳定度较基质沥青混合料、4.0%SBS改性沥青混合料、6.0%PU改性沥青混合料分别提高了249.9%、138.5%、69.7%。这表明与掺入SBS或PU单一改性剂的沥青混合料相比,SBS/PU复合改性沥青混合料的高温抗永久变形能力更好,SBS/PU复合改性沥青对混合料的高温稳定性有很好的改善效果。

2) 2.0% SBS+6.0%PU复合改性沥青混合料的最大弯拉应变与4.0%SBS改性沥青混合料的相当,比6.0%PU改性沥青混合料的大。这表明SBS/PU复合改性沥青混合料的低温抗裂性能要比单一PU改性沥青混合料的更佳。同时,SBS/PU复合改性沥青降低了SBS的用量,这对于节约资源也有着重要意义。

3) SBS/PU复合改性沥青混合料的残留稳定度及冻融劈裂抗拉强度比均比基质沥青混合料和6.0%PU改性沥青混合料的高。同时,SBS/PU复合改性沥青混合料随着PU掺量的增加,其残留稳定度先逐步上升而后趋于稳定,这表明SBS/PU复合改性对于提升沥青混合料的水稳定性是可行的。

4) PU可以取代部分SBS对沥青进行改性,在综合考虑沥青混合料的路用性能和工程经济因素的前提下,本研究认为2.0%SBS+6.0%PU复合改

性沥青的改性效果最佳。

[参考文献]

- [1] 鲁玉莹,余黎明,方洁,等. 聚合物改性沥青的研究进展[J]. 化工新型材料, 2020, 48(4): 222-225, 230. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2020.04.049.
LU Yuying, YU Liming, FANG Jie, et al. Research development of polymer modified asphalt [J]. New Chemical Materials, 2020, 48(4): 222-225, 230. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2020.04.049.
- [2] 肖凤,邓星鹤. 沥青改性剂研究进展[J]. 中国胶粘剂, 2020, 29(9): 61-66. DOI: 10.13416/j.ca.2020.09.015.
XIAO Feng, DENG Xinghe. Research progress of asphalt modifier [J]. China Adhesives, 2020, 29(9): 61-66. DOI: 10.13416/j.ca.2020.09.015.
- [3] 秦成林,董夫强,李洋,等. SBS改性沥青在循环加热储存过程的性能衰减和提升研究[J]. 公路工程, 2022, 47(1): 115-122. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2022.01.018.
QIN Chenglin, DONG Fuqiang, LI Yang, et al. Study on properties attenuation and recovery of SBS-modified asphalt during the process of cyclic heating storage [J]. Highway Engineering, 2022, 47(1): 115-122. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2022.01.018.
- [4] 曹雪娟,彭硕,丁勇杰,等. 聚氨酯改性沥青的研究进展[J]. 化工新型材料, 2021, 49(10): 213-218. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2021.10.045.
CAO Xuejuan, PENG Shuo, DING Yongjie, et al. Research progress on polyurethane modified asphalt [J]. New Chemical Materials, 2021, 49(10): 213-218. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2021.10.045.
- [5] SMITH J D, MELLOTT J W, RUS M, et al. Active polymer modification of bitumen for use in roofing materials:US 20190177543 [P].2019
- [6] BAZMARA B, TAHERSIMA M, BEHRAMAN A. Influence of thermoplastic polyurethane and synthesized polyurethane additive in performance of asphalt pavements [J]. Construction and Building Materials, 2018, 166: 1-11. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.093.
- [7] KHAIRUDDIN F H, ALAMAWI M Y, YUSOFF N I M, et al. Physicochemical and thermal analyses of polyurethane modified bitumen incorporated with Cecabase and Rediset: optimization using response surface methodology [J]. Fuel, 2019, 254: 115662. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.115662.
- [8] 孙敏,郑木莲,毕玉峰,等. 聚氨酯改性沥青改性机理和性能[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(2): 49-58. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2019.02.005.
SUN Min, ZHENG Mulian, BI Yufeng, et al.

- Modification mechanism and performance of polyurethane modified asphalt [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2019, 19(2): 49-58. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2019.02.005.
- [9] 张欢. 聚氨酯改性沥青及其混合料路用性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2020.001433.
- ZHANG Huan. Research on road performance of polyurethane modified asphalt and its mixture [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2020.001433.
- [10] 董文卓. 炭黑/聚氨酯复合改性沥青技术性能研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2020. DOI: 10.26985/d.cnki.gcsjc.2020.000568.
- DONG Wenzhuo. Study on properties of carbon black/thermoplastic polyurethanes composite modified asphalt [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2020. DOI: 10.26985/d.cnki.gcsjc.2020.000568.
- [11] 李韬, 薛永兵, 刘振民, 等. 聚氨酯改性沥青的研究进展 [J]. *当代化工*, 2022, 51(4): 954-958. DOI: 10.13840/j.cnki.cn21-1457/tq.2022.04.012.
- LI Tao, XUE Yongbing, LIU Zhenmin, et al. Research progress of polyurethane modified asphalt [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2022, 51(4): 954-958. DOI: 10.13840/j.cnki.cn21-1457/tq.2022.04.012.
- [12] 宋亮, 王朝辉, 舒诚, 等. SBS/胶粉复合改性沥青研究进展与性能评价 [J]. *中国公路学报*, 2021, 34(10): 17-33. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.10.002.
- SONG Liang, WANG Chaohui, SHU Cheng, et al. Research progress and performance evaluation of SBS/CR-modified asphalt [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(10): 17-33. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.10.002.
- [13] 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.
- [14] 张争奇, 田中男, 黄硕磊, 等. SBS-PU高黏高弹沥青材料组成及工艺参数研究 [J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(1): 100-107. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2020.01.015.
- ZHANG Zhengqi, TIAN Zhongnan, HUANG Shulei, et al. Composition and process parameters of SBS-PU modified high-viscosity and high-elasticity asphalt [J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(1): 100-107. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2020.01.015.
- [15] 王辉, 周争辉, 詹诗浩, 等. 废胶粉/SBS复合改性沥青混合料CR/SHMA-13的级配研究 [J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 18(3): 1-7. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxxbzk.20210918.001.
- WANG Hui, ZHOU Zhenghui, ZHAN Shihao, et al. Study on gradation of waste crumb rubber/SBS composite modified CR/SHMA-13 asphalt mixture [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2021, 18(3): 1-7. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxxbzk.20210918.001.
- [16] 陈芳, 杨秋菊, 段婷, 等. 聚氨酯改性沥青的改性技术及相容性研究 [J]. *公路交通技术*, 2022, 38(1): 1-6. DOI: 10.13607/j.cnki.gljt.2022.01.001.
- CHEN Fang, YANG Qiuju, DUAN Ting, et al. Study on modified technology and compatibility of polyurethane modified asphalt [J]. *Technology of Highway and Transport*, 2022, 38(1): 1-6. DOI: 10.13607/j.cnki.gljt.2022.01.001.
- [17] 张乃计. 车载和温度综合作用下沥青路面疲劳寿命研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022. DOI: 10.27671/d.cnki.gcjtc.2021.000012.
- ZHANG Naiji. Study on fatigue life of asphalt pavement under coupling action of traffic load and temperature [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022. DOI: 10.27671/d.cnki.gcjtc.2021.000012.
- [18] 吕建华, 赵正良, 陈文, 等. 沥青混合料级配范围优化方法及应用 [J]. *中外公路*, 2020, 40(4): 213-217. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2020.04.046.
- LYU Jianhua, ZHAO Zhengliang, CHEN Wen, et al. Optimization method and application of gradation range of rubber asphalt mixture [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2020, 40(4): 213-217. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2020.04.046.
- [19] 于彬. 基于SCB方法的再生沥青混合料低温性能研究 [J]. *湖南交通科技*, 2023, 49(2): 76-80, 93. DOI: 10.3969/j.issn.1008-844X.2023.02.014.
- YU Bin. Study on low temperature performance of recycled asphalt mixture based on SCB method [J]. *Hunan Communication Science and Technology*, 2023, 49(2): 76-80, 93. DOI: 10.3969/j.issn.1008-844X.2023.02.014.
- [20] 张思琴, 查旭东, 邹博, 等. 中面层沥青混合料低温性能的对比如试验评价 [J]. *交通科学与工程*, 2023, 39(2): 23-30. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20211018001.
- ZHANG Siqin, ZHA Xudong, ZOU Bo, et al. Comparative test evaluation of low-temperature performance for asphalt mixture in middle surface layer [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2023, 39(2): 23-30. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20211018001.
- [21] 黄峰, 王振潭, 颜国欣. 低黏高弹改性剂对沥青及沥青混合料性能的影响 [J]. *公路与汽运*, 2023(3): 91-93. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.03.020.

- HUANG Feng, WANG Zhentan, YAN Guoxin. Effect of low viscosity and high elasticity modifier on properties of asphalt and asphalt mixture[J]. Highways & Automotive Applications, 2023 (3): 91-93. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.03.020.
- [22] 张树文, 赵佃宝, 曲恒辉, 等. 基于低温弯曲蠕变试验的沥青混合料低温性能分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(9): 100-104.
- ZHANG Shuwen, ZHAO Dianbao, QU Henghui, et al. Analysis of low temperature performance of asphalt mixture based on low temperature bending creep test [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, (Application Technology Edition) 2019, 15(9): 100-104.

Experimental study on performance of SBS/PU composite modified asphalt mixture

ZHANG Yingxue¹, ZHU Wenjing¹, QIU Donghua², ZHANG Hao³

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Hangzhou Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310012, China; 3. Hainan Provincial Bureau of Transportation Engineering and Construction, Haikou 570100, China)

Abstract: [Purposes] This study aims to investigate the performance of styrene-butadiene-styrene block copolymer (SBS) and polyurethane (PU) composite modified asphalt mixture. [Methods] The composite modified asphalt was prepared by 2.0% SBS and PU with different dosages (4.0%, 6.0% and 8.0%), and modified asphalt was used to produce the dense-graded asphalt mixture AC-13. The high-temperature rutting resistance, low-temperature crack resistance and water stability of the asphalt mixture were evaluated by Marshall test, rutting test and low-temperature bending creep test were performed, and the modified asphalt mixture with 4.0% SBS and 6.0% PU was set as the control group. [Findings] SBS/PU composite modified asphalt mixture can meet the road performance requirements for asphalt pavement. Among them, the dynamic stability of 2.0%SBS+6.0%PU composite modified asphalt mixture was 144%, 19% and 52% higher than that of matrix asphalt mixture, 4.0% SBS modified asphalt mixture and 6.0% PU modified asphalt mixture, respectively. The high temperature stability of SBS/PU composite modified asphalt mixture was improved compared with that of the control group, and the water stability was comparable to that of the control group, and the improvement effect on low temperature performance was not obvious. [Conclusions] Considering the modification efficiency and economical efficiency, the optimal content of SBS/PU composite modified asphalt mixture is 2.0%SBS+6.0%PU.

Key words: modified asphalt; styrene-butadiene-styrene block copolymer (SBS); polyurethane (PU); compound modification; pavement performance

Manuscript received: 2022-05-23; **revised:** 2022-05-30; **accepted:** 2022-05-31

Foundation item: Project(CX2021SS15) supported by Changsha University of Science & Technology Research and Innovation; Project(1908085QE217) supported by Natural Science Foundation of Anhui Province; Project(J-ZX-ZAK-02-2021) supported by Transportation Science and Technology of Hainan Province

Corresponding author: ZHANG Yingxue (1970—) (ORCID: 0000-0002-0937-4004), female, associate professor, research interest: traffic environment engineering and road alignment design, E-mail: csuzyx@126.com

(责任编辑:刘平;校对:赵冰;英文编辑:李岳林)