

文章编号:1671-8879(2019)01-0017-08

# 全透式沥青路面专用高黏度改性 沥青性能对比

曹东伟<sup>1,2,3</sup>, 卢 杰<sup>1,2</sup>, 张海燕<sup>2,3</sup>, 夏 磊<sup>2,3</sup>, 丁润铎<sup>2,3</sup>, 许 斌<sup>2,3</sup>

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088;

3. 中路高科(北京)公路技术有限公司, 北京 100088)

**摘 要:**为了制备一种全透式沥青路面专用高黏度改性沥青,采用自制改性粒子(SR)与 SBS 粒子为复配改性剂,对基质沥青进行复合改性。通过荧光显微照相、针入度试验、延度试验、软化点试验、薄膜老化试验、动力黏度试验及布氏黏度试验等,对自制高黏度改性沥青性能进行表征,并与 SK90<sup>#</sup> 基质沥青、橡胶沥青、SBS 改性沥青进行性能对比。结果表明:各改性材料在基质沥青中分散良好,自制高黏度改性沥青中的 SR 粒子作为高弹嵌挤单元提高了沥青交联网状结构的稳定性;与基质沥青相比,改性沥青具有较高的软化点和延度,以及较低的针入度(25 ℃);自制高黏度改性沥青的动力黏度高达 230 kPa·s,明显高于橡胶沥青和 SBS 改性沥青;动态剪切流变试验(DSR))中自制高黏度改性沥青高温分级达到 PG82 ℃,较 SBS 改性沥青和橡胶沥青提高 1 个等级,较基质沥青提高 4 个等级,高温变形可恢复性能最强;4 种沥青的原样和薄膜老化后沥青中以自制高黏度改性沥青的车辙因子随温度变化最为缓慢,高温敏感性最弱,耐老化性能优异;弯曲梁流变试验(BBR)中,SBS 改性沥青和自制高黏度改性沥青的低温分级均达到 PG-18 ℃,较基质沥青和橡胶沥青高 1 个等级,但自制高黏度改性沥青的蠕变劲度较小,蠕变速率较大,具有更强的低温柔性。

**关键词:**道路工程;改性沥青;流变性能;全透式沥青路面

**中图分类号:**U416.217

**文献标志码:**A

## Contrastive on performance of fully permeable asphalt pavement dedicated high-viscosity modified asphalt

CAO Dong-wei<sup>1,2,3</sup>, LU Jie<sup>1,2</sup>, ZHANG Hai-yan<sup>2,3</sup>, XIA Lei<sup>2,3</sup>, DING Run-duo<sup>2,3</sup>, XU Bin<sup>2,3</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China; 3. Zhonglu Gaoke

(Beijing) Road Technology Co., Ltd, Beijing 100088, China)

**Abstract:** To prepare dedicated high-viscosity-modified asphalt for a fully permeable asphalt pavement, self-made SR particles and SBS particles were used as combined modifiers to modify the matrix asphalt. The performance of self-made high-viscosity-modified asphalt was characterized by fluorescence microscopy and penetration, ductility, softening point, film oven, kinetic viscosity, and Brookfield viscosity testing. The performance of this asphalt was compared

收稿日期:2018-10-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51478211);国家国际科技合作专项项目(2016YFE0108200)

作者简介:曹东伟(1974-),男,河北廊坊人,研究员,工学博士,E-mail:caodongwei@vip.126.com。

with the performances of SK90<sup>#</sup> base asphalt, rubber asphalt, and SBS-modified asphalt. The results show that the modified materials have good dispersion in asphalt, and the SR particles, as highly elastic interlocking units, strengthened the stability of the cross-linked network structure. Compared to the base asphalt, the modified asphalts have a high softening point and ductility and low penetration (25 °C). The kinetic viscosity of dedicated high-viscosity-modified asphalt reaches 230 kPa · s, which is significantly higher than that of rubber asphalt and SBS-modified asphalt. A dynamic shear rheological test shows that the self-made high-viscosity-modified asphalt's high temperature grade reaches PG82 °C, which is one grade higher than SBS-modified asphalt and rubber asphalt, and four grades higher than base asphalt, with the strongest restorability of high-temperature deformation. The rutting factors of dedicated high-viscosity-modified asphalt changes the slowest with increasing temperature, with the weakest sensitivity to high temperature and the strongest aging resistance of the original and postrotating film oven test rutting factors of four types of asphalts. The low temperature grade of SBS-modified asphalt and that of the dedicated high-viscosity modified asphalt reach PG-18 °C, of a bending beam rheometer test, which is one grade higher than base asphalt and rubber asphalt, and the dedicated high-viscosity-modified asphalt with a better creep stiffness and a higher creep rate exhibits good low-temperature flexibility. 7 tabs, 6 figs, 25 refs.

**Key words:** road engineering; modified asphalt; rheological property; fully permeable asphalt pavement

## 0 引言

全透式沥青路面是指雨水可以渗透至路面结构内部的一种新型透水沥青路面,具有降噪、抗滑、提高雨天行车安全性、减少地表径流及水污染等优点<sup>[1-4]</sup>。由于全透式沥青混凝土采用开级配、大空隙结构设计,混合料更易受到阳光、大气和雨水等不利因素影响;同时,透水路面结构内部长期处于潮湿环境并受到复杂交通荷载作用,混合料更容易发生剥落、松散等病害,这就要求沥青结合料对集料具有较强的裹附性和黏结强度,使路面具有较强的抗飞散性能和抗水损害性能<sup>[5]</sup>。高黏度改性沥青具有高黏、高弹特性,对石料黏附性较强,表现出优异的高低温性能及水稳定性,因此,受到众多学者关注。Hussein 等将无机纳米陶瓷粉掺入沥青中,通过微观分析得出其与基质沥青形成互动的化学键和碳氢化合物,同时芳烃键也得到增强,多环芳烃结构的形成增强了沥青的黏度和弹性<sup>[6]</sup>。Xiong 等研究了不同纤维对沥青的改性机制,认为纤维可以提高沥青的剪切阻力,在沥青中形成空间网络可加强基质沥青的黏附性和稳定性<sup>[7]</sup>。SBS 作为一种性能优异的热塑性弹性体,是目前应用最广泛的聚合物高黏沥青改性剂。Zhang 等以 SBS 为主要改性剂,糠醛精油为增塑剂、硫为交联剂制备了高黏改性沥青,结果

表明,增塑剂可促进 SBS 在沥青中的溶胀和分散,提高沥青黏度,交联剂可促进聚合物形成稳定的网状体系,有效改善沥青的耐老化性能<sup>[8-9]</sup>。Cong 等研究了不同类型的炭黑材料对 SBS 改性沥青性能的影响,认为炭黑可提高沥青的导电性和导热性,从而增强其高温性能及抗老化性能<sup>[10]</sup>。Wu 等发现 4A 沸石可以改善沥青的老化性能,并提高 SBS 改性沥青的高温稳定性,当其掺量(质量分数,下同)为 6% 时改性效果达到最佳<sup>[11]</sup>。Alam 等研究了不同剂量下多聚硫酸及 SBS 对基质沥青的改性效果,通过改变沥青中芳烃、胶质和沥青质的比例,可提高沥青的黏度值,指出在 -8 °C ~ -12 °C 温度下,多聚磷酸对沥青的低温性能的影响最为显著<sup>[12-14]</sup>。Zhao 等认为层状双氢氧化物能延缓沥青结合料的老化速度,有利于增强混合料间黏结强度、改善 SBS 改性沥青混合料的长期低温性能<sup>[15]</sup>。丛玉凤等采用 C9 石油树脂及 SBS 改性剂对基质沥青进行改性,发现 C9 石油树脂可提高 SBS 与基质沥青间的结合力,及其对基质沥青的约束力,形成新的交联结构,增强沥青的黏附能力<sup>[16]</sup>。钱春香等采用单体接枝 SBS 技术改善了 SBS 与沥青的相容性,可促进聚合物在沥青中长时间发挥改性效果<sup>[17]</sup>。陈瑶等研究了高黏沥青添加剂对不同原油的改性效果,以 60 °C 黏度为关键评价指标,研究认为不同原油类型

的改性效果差异较大,当高黏度沥青改性剂(TPS)量为 14%~16%时改性沥青的黏度迅速增加<sup>[18]</sup>。王笑风等对橡胶沥青的改性机理进行了研究,认为废胶粉通过溶胀、黏连等作用方式可有效提高改性沥青的黏度,同时,其混合料的水稳定性和高温性能得到提高,但是低温性能不理想<sup>[19-20]</sup>。

综上所述,采用微观效应优良的纳米材料、增黏树脂、纤维、橡胶粉、高分子聚合物等通过一定的制备工艺使沥青材料兼具各改性材料的优异特性,从而达到优势互补的改性效果,其中高分子聚合物 SBS 更是被广泛用于制备高黏度改性沥青。目前对高黏度改性沥青的研究较多,高品质改性沥青的黏度甚至远超出规范要求,但是在耐久性、水稳定性等方面的研究还存在不足,往往不能达到全透式沥青路面的理想使用效果。因此,本文采用自制 SR 粒子及 SBS 改性剂对基质沥青进行复合改性,制备一种针对全透式沥青路面的高黏度改性沥青,并从常规性能、微观结构及动态力学性能方面进行对比研究,考察自制高黏度改性沥青在透水路面中的适用性,为进一步优化材料性能提供参考依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

基质沥青选用 SK90<sup>#</sup> 型,橡胶粉购自山东恒丰橡胶有限公司(细度 0.25 mm),SBS 购自岳阳石油化工总厂,SR 粒子为利用废旧材料实验室自制。SK90<sup>#</sup> 基质沥青、橡胶粉及 SBS 主要性能指标见表 1~表 3。

表 1 SK90<sup>#</sup> 基质沥青性能指标

Tab. 1 Performance indicators of SK 90<sup>#</sup> base asphalt

参数		参数值
针入度(25℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm		80.6
软化点/℃		46.3
延度(10℃, 5 cm·min <sup>-1</sup> )/cm		>100
布氏黏度(135℃)/(Pa·s)		377.5
沥青薄膜	质量变化率/%	0.011
加热试验	针入度比(25℃, 100 g, 5 s)/%	84.7
后残留物	延度(10℃, 5 cm·min <sup>-1</sup> )/cm	9.6

表 2 橡胶粉性能指标

Tab. 2 Performance indicators of rubber powder %

组分	灰分	橡胶烃含量	纤维含量	炭黑含量
掺量	3	45	0.08	38

### 1.2 试验方法

#### (1) 沥青的制备

选取橡胶沥青(由 SK90<sup>#</sup> 和掺量为 18%橡胶粉

表 3 SBS 性能指标

Tab. 3 Performance indicators of SBS

型号	充油量/%	300%定伸应力/MPa	拉伸强度/MPa	扯断伸长率/%
791H	0	≥2.2	≥16.0	≥700

制备)、SBS 改性沥青(由 SK90<sup>#</sup> 和掺量为 6% SBS 制备)、自制高黏度改性沥青(由 SK90<sup>#</sup> 和复配改性剂制备)、SK90<sup>#</sup> 基质沥青备用。

#### (2) 荧光分散性观察

取 0.5 g 样品置于载玻片上,放置在 100℃的加热台上加热,使样品均匀摊铺开,将载玻片置于物镜下,采用荧光显微镜观察改性剂在沥青中的分散状态。

#### (3) 改性沥青常规性能测试

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的相关规定对基质沥青、橡胶沥青、SBS 改性沥青、自制高黏度改性沥青进行性能测试,包括沥青三大指标:针入度、软化点、延度。参照规程中真空减压毛细管法及布洛克菲尔德黏度计测定 60℃动力黏度和 175℃布氏黏度,试验装置如图 1 所示。

#### (4) 流变试验

按照美国 AASHTO M320-10 中规定的方法对 4 种沥青进行 PG 分级测试。高温分级试验:采用动态剪切流变仪(DSR)分别对基质沥青和改性沥青原样及薄膜烘箱老化(TFOT)后的沥青进行震荡扫描,选取 Φ25 mm 的平行板,上下板间距为 1 mm,角频率为 10 rad/s,每 6℃一个温度等级进行震荡加载试验,如图 2 所示;分别测试沥青的复数模量  $G^*$ 、相位角  $\delta$ 、车辙因子  $G^*/\sin(\delta)$ ,以原样沥青的车辙因子  $G^*/\sin(\delta) \geq 1.0$  kPa,TFOT 老化后沥青的车辙因子  $G^*/\sin(\delta) \geq 2.2$  kPa 这一条件确定沥青样品的高温等级。低温分级试验:采用弯曲梁流变仪(BBR)分别对基质沥青和 SBS 改性沥青 TFOT+PAV(压力老化)阶段后的沥青样品进行试验,在-12℃、-18℃、-24℃下测定蠕变劲度模量  $S$  和蠕变速率  $m$ ,以蠕变劲度模量  $S \leq 300$  MPa、蠕变速率  $m \geq 0.3$  为条件确定沥青样品的低温等级<sup>[21]</sup>。

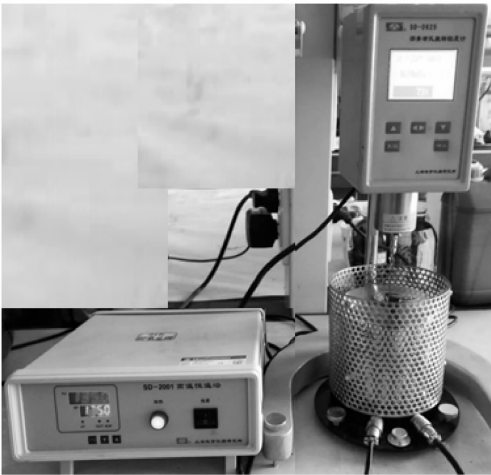
## 2 试验结果与分析

### 2.1 微观结构分析

荧光显微镜将沥青放大 100 倍,观察基质沥青、橡胶沥青、SBS 改性沥青、自制高黏度改性沥青的微观结构。不同沥青微观结构如图 3 所示。



(a) 动力黏度试验



(b) 布氏黏度试验

图1 动力黏度及布氏黏度试验  
Fig.1 Kinetic viscosity test and Brookfield viscosity test



图2 DSR 震荡加载试验  
Fig.2 DSR shock loading test

显微照相方法可以用来直接研究添加剂在沥青体系中的分布行为以及相界面行为,是分析沥青改性机理的有效方法<sup>[22]</sup>。图 3(a)是基质沥青的显微照相,可以看出视野中无任何杂质、均匀纯净。图 3(b)为橡胶沥青显微照相,可以看出,高速剪切后

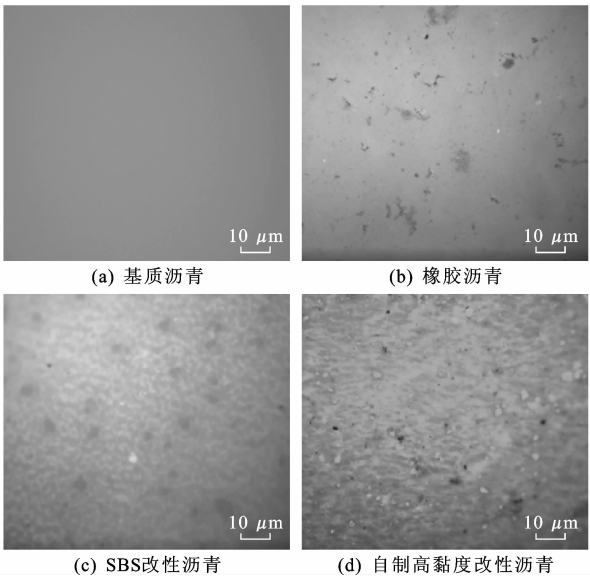


图3 不同沥青微观结构  
Fig.3 Microscopic morphologies of different asphalts

的橡胶粒子大小不一且界面模糊,以絮状结构散布在沥青中。图 3(c)为 SBS 改性沥青显微照相,可以看出,SBS 微小粒子在基质沥青中均匀分散,聚合物改性剂分子量较大,掺入沥青后提高了改性沥青的平均分子量,沥青的稠度提高,阻碍了沥青之间的流动,通过溶胀和吸附作用与沥青发生交联反应,SBS 粒子与沥青之间没有明显界面。由图 3(d)可以看出,自制高黏度改性沥青具有比图 3(c)更加致密、稳定的网状结构,SR 粒子作为高弹性嵌挤单元均匀分布在 SBS 交联网状结构中,同时吸收沥青中的轻质组分而溶胀,沥青分散介质相对减少,沥青更加黏稠,结构内部的作用力得到增强,形成均一稳定体系。

2.2 常规性能指标

2.2.1 三大指标试验

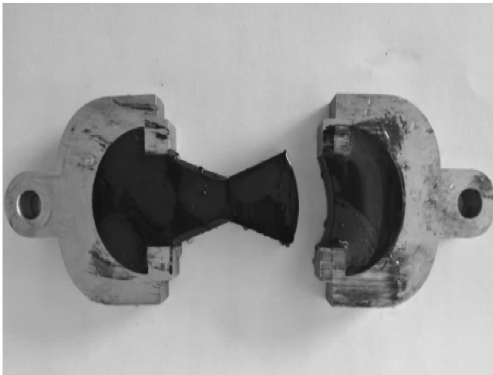
对基质沥青、橡胶沥青、SBS 改性沥青、自制高黏度改性沥青的常规性能进行测试,试验结果见表 4。

表 4 沥青三大性能指标

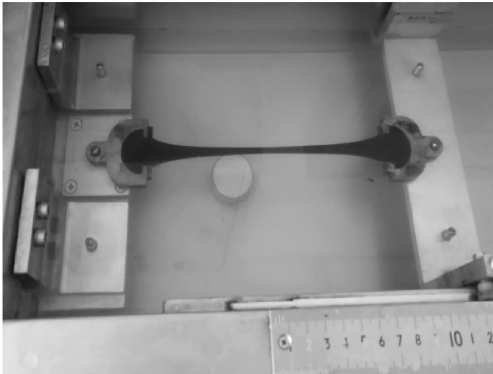
Tab.4 Three performance indicators of asphalts			
沥青类型	针入度(25℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm	软化点/℃	延度 (5 cm·min <sup>-1</sup> , 5℃)/cm
基质沥青	80.6	46.3	0
橡胶沥青	45.6	71.0	12
SBS 改性沥青	53.5	92.0	41
自制高黏度改性沥青	54.6	103.2	45

由表 4 可知,与改性沥青相比,基质沥青高低温性能都得到了提高。图 4 为基质沥青试件和自制改

性沥青试件试验后延度,可见基质沥青在 5℃延度试验中直接脆断,而自制高黏度改性沥青低温延性较好。橡胶沥青的三大指标相比其他 2 种改性沥青较低,胶粉粒子吸收了沥青中的油分发生溶胀,在长时间高温下发生裂解反应,使沥青质含量相对增加,改性后的沥青变稠,高低温性能得到不同程度的提高;但胶粉粒子的弹性不如高分子聚合物,且胶粉不能像 SBS 改性剂一样与基质沥青相互交联成稳定的网状结构,同时,在低温下胶粉粒子处于刚性较强的状态,受到集中应力作用容易断裂。



(a) 基质沥青试件



(b) 自制高黏度改性沥青试件

图 4 基质沥青试件和自制高黏度改性沥青试件试验后延度  
Fig. 4 Base asphalt and self-made high viscosity modified asphalt test samples after ductility test

SBS 改性沥青和自制高黏度改性沥青的各项指标相差不大,从 2 种改性沥青组分分配比的角度分析,沥青中 SBS 的改性作用使沥青变稠、变硬,从而提高改性沥青的高温稳定性和低温柔性。自制高黏度改性沥青各项指标均优于 SBS 改性沥青,表现出自制 SR 粒子对沥青高低温性能的影响:自制 SR 粒子为大分子量的弹性体,高温下相对基质沥青较硬,以较小的变形吸收较多的应力;低温下相对基质沥青较软,以较大的变形吸收较少的应力,从而改善了沥青的高低温性能。

2.2.2 黏度试验

对基质沥青、橡胶沥青、SBS 改性沥青、自制高黏度改性沥青进行黏度试验,试验结果见表 5。

表 5 沥青黏度指标  
Tab. 5 Viscosity indicators of asphalts Pa·s

沥青类型	动力黏度(60℃)	布氏黏度(175℃)
基质沥青	213	0.083
橡胶沥青	16 700	3.418
SBS 改性沥青	63 560	1.245
自制高黏度改性沥青	232 600	1.520

由表 5 可知,改性沥青黏度显著高于基质沥青。沥青与胶粉的共混主要属于物理共混伴随物理溶胀、溶解作用,并未与沥青发生化学反应,橡胶沥青胶粉颗粒较大且表面粗糙,与沥青的相容性较差,导致其黏度较低。SBS 改性沥青和自制高黏度改性沥青中 SBS 掺配比例较高,在长时间高温发育下 SBS 与基质沥青反应充分,形成交联体系,具有较高的黏度。同时,自制高黏度改性沥青中的 SR 粒子溶胀后形成黏弹性胶粒,吸附在沥青网络中,增强了沥青分子之间附着力,沥青动力黏度得到提高。

根据《透水沥青路面技术规程》(CJJ/T 190—2012)中要求沥青结合料的 60℃动力黏度不低于 20 kPa·s,可知,本文中橡胶沥青动力黏度不能满足要求,而 SBS 改性沥青和自制高黏度改性沥青的动力黏度值远高于其要求。全透式沥青路面结构长时间处于潮湿状态,动力黏度高的沥青结合料有助于提高集料的黏结强度,减少路面水损害。自制高黏度改性沥青具有更高的动力黏度和适中的布氏黏度,沥青分子间具有很强的作用力,可形成更厚的沥青薄膜,有效黏附石料,提高沥青混凝土的抗飞散性能及水稳定性,延长路面的使用耐久性,适中的布氏黏度表明其混合料不需过高的施工温度,又可降低能源消耗,减少废气排放。

2.3 动态剪切流变试验

对基质沥青、橡胶沥青、SBS 改性沥青、自制高黏度改性沥青进行分级试验,不同沥青复数模量、相位角随温度的变化见图 5、图 6。

沥青属于感温性材料,其性能会随着温度的升高或降低而产生较大变化,复数模量通常用于描述材料抵抗重复剪切应力变形的能力,相位角用于描述沥青材料中不可恢复的黏性成分比例<sup>[23]</sup>。由图 5 和图 6 可知:在试验温度范围内,随着温度升高,沥青的复数模量降低,相位角明显升高,说明测试温度越高,沥青的流动性越强,表现出更多的不可恢复黏

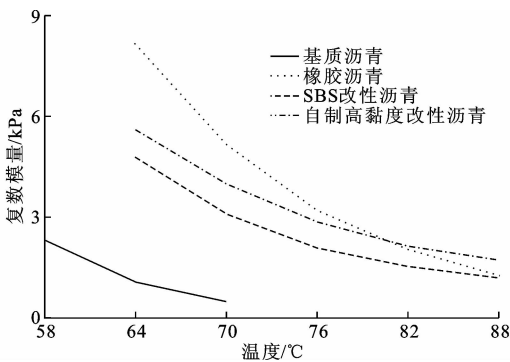


图5 不同沥青复数模量随温度变化

Fig. 5 Curves of modulus versus temperature of different asphalts

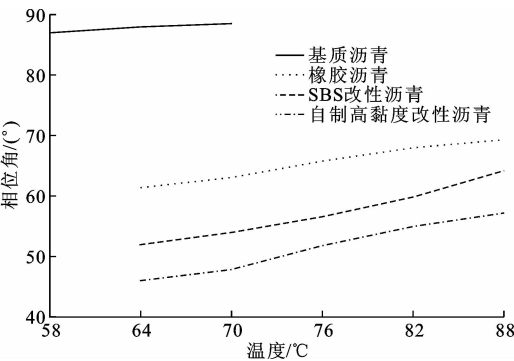


图6 相位角随温度变化

Fig. 6 Curves of  $\delta$  versus temperature of different asphalts

性成分,变形可恢复能力差,易产生永久变形。改性

沥青的复数模量远高于基质沥青,随着测试温度升高,橡胶沥青的复数模量急剧下降,自制高黏度改性沥青及 SBS 改性沥青复数模量随温度变化相对缓慢,当温度达到 82 ℃ 时,自制高黏度改性沥青复数模量明显优于另外 2 种改性沥青;沥青的相位角随温度变化具有明显的线性关系,相位角从大到小依次为基质沥青、橡胶沥青、SBS 改性沥青、自制高黏度改性沥青。对试验结果进一步分析可知,胶粉、SBS、自制 SR 粒子等对沥青高温改性效果显著,降低了沥青中不可恢复黏性成分及变形引起的模量损失。橡胶沥青不具有 SBS 改性沥青及自制高黏度改性沥青的网络状结构,性能受温度影响明显,稳定性较差;高温下 SBS 中的聚苯乙烯和聚丁二烯分别促进了共聚物的强度和弹性,而自制高黏度改性沥青中自制改性粒子具有相对较强的劲度,同时增强了沥青体系结构劲度和稳定性,使沥青在宏观上表现出更强的弹性及高温抗变形能力。

根据美国公路战略研究计划(SHRP)以沥青车辙因子  $G^*/\sin(\delta)$  确定沥青分级 PG,规定原样沥青的  $G^*/\sin(\delta) \geq 1.0$  kPa,TFOT 残留沥青的  $G^*/\sin(\delta) \geq 2.2$  kPa。对不同沥青样品原样和 TFOT 残留沥青进行 DSR 试验,得出沥青的高温分级,试验结果如表 6 所示。

表 6 薄膜老化前后高温分级结果

Tab. 6 High temperature classification results before and after TFOT

沥青类型	不同温度(℃)下的原样沥青车辙因子/kPa						不同温度(℃)下的 TFOT 残留物车辙因子/kPa						PG 高温等级/℃
	58	64	70	76	82	88	58	64	70	76	82	88	
基质沥青	2.30	1.06	0.52				4.76	2.17	0.86				58
橡胶沥青		8.27	5.79	3.48	2.17	1.04			6.29	3.71	2.15	1.42	76
SBS 改性沥青		5.96	3.95	2.82	2.23	1.95			4.12	2.71	1.87	1.16	76
自制高黏度改性沥青		7.96	5.34	4.07	3.29	2.73			5.77	3.83	2.63	1.88	82

由表 6 可知:改性沥青较基质沥青的高温等级均有所提高,橡胶沥青和 SBS 改性沥青高温等级为 PG76 ℃,相比基质沥青提高了 3 个等级;而自制高黏度改性沥青高温等级为 PG82 ℃,相比基质沥青提高了 4 个等级。沥青在长时间高温环境中沥青质增加,胶质、芳香分和饱和分的含量减小<sup>[24]</sup>,在重复荷载作用下材料的变形不可恢复黏性成分增加,容易产生永久变形,导致老化后沥青车辙因子普遍降低。由于改性沥青更为黏稠,在 TFOT 老化过程中不能像基质沥青那样顺畅流动形成均匀的沥青薄膜,薄膜内部沥青不能得到充分的热氧老化,降低了沥青整体的老化程度,在试验中表现出更加优越的性能。

车辙因子越大表明抗车辙性能越强,反之,抗车辙性能越差。沥青老化前后车辙因子曲线随着温度的升高逐渐交叉,老化后沥青中部分轻质组分裂解、挥发,流动介质减少,沥青变硬,对温度更加敏感。橡胶沥青的车辙因子随试验温度的升高而显著下降,与基质沥青表现相似,SBS 改性沥青和自制高黏度改性沥青下降速率相对较小。自制高黏度改性沥青老化前后的车辙因子变化幅度最小,说明其高温敏感性最弱,耐老化性能更强,有利于改善透水沥青混合料的耐老化性能,延长路面使用寿命。

2.4 弯曲梁流变试验(BBR)

对 TFOT+PAV 阶段后的基质沥青和改性沥

青在-12℃、-18℃、-24℃下进行低温弯曲蠕变试验,不同沥青样品的蠕变劲度模量  $S$ 、蠕变速率  $m$  随温度变化如表 7 所示。

表 7 不同沥青低温分级结果

Tab. 7 Low temperature grade results of different asphalts								
BBR 试验 温度	基质沥青		橡胶沥青		SBS 改性 沥青		自制高黏度 改性沥青	
	S/MPa	$m$	S/MPa	$m$	S/MPa	$m$	S/MPa	$m$
-12℃	190.0	0.340	66.1	0.385	85.9	0.398	71.2	0.421
-18℃	436.0	0.235	161.0	0.290	227.0	0.328	189.0	0.336
-24℃	737.0	0.181	342.0	0.247	483.0	0.247	402.0	0.271
PG 低温 分级/℃	-12		-12		-18		-18	

SHRP 研究计划认为:路面在低温条件下容易发生低温开裂,优良低温性能的沥青材料表现为具有较好的低温柔性,相应的蠕变劲度模量越小;沥青材料具有较强的应力松弛性能,相应的蠕变劲度速率越大<sup>[25]</sup>。

由表 7 可知,温度越低,各沥青的劲度模量越大,蠕变速率越小,符合用劲度模量和蠕变速率表征沥青材料在低温状态和固定荷载压力下的流变与应力松弛特性规律。随着温度的变化,改性沥青的劲度模量均小于基质沥青,低温下基质沥青表现出较强的刚性,而胶粉、SBS、自制 SR 粒子具有相对较大的弹性,从而提高了改性沥青的低温柔性。沥青蠕变速率随着温度的降低呈线性下降趋势,改性沥青蠕变速率更小,具有良好的应力松弛性能,低温环境下沥青的弹性恢复能力较好。

由低温分级结果可知,基质沥青和橡胶沥青低温分级均为 PG-12℃,蠕变劲度模量随分级温度的降低而急剧增加,蠕变速率较大,低温抗开裂性能减小,这与沥青延度试验结果规律基本一致。SBS 改性沥青和自制高黏度改性沥青的低温等级均为 PG-18℃,自制高黏度改性沥青的蠕变劲度模量小于 SBS 改性沥青,且蠕变速率更大,说明自制高黏度改性沥青的应力松弛性能更强,具有较好的低温抗裂性能;低温下自制 SR 改性粒子与 SBS 表现出更多的柔韧性,从而提高沥青材料的低温性能,并有利于改善低温潮湿环境中透水沥青混合料的路用性能。

3 结 语

(1)采用 SBS 和自制 SR 粒子制备了一种应用于全透式沥青路面的成品高黏度改性沥青,沥青中各组分均匀分散,无团粒结块,形成稳定的连续相,

其高低温性能均较基质沥青大幅度提高,尤其是高温性能改善效果明显。

(2)自制高黏度改性沥青动力黏度远高于其他 2 种改性沥青,能有效裹附大孔隙沥青混凝土,减少路面的剥落掉粒,提高抗水损害能力,适用于大空隙、开级配结构的全透式沥青路面。

(3)橡胶沥青的中温抗变形能力较强,但是随着温度升高,抗变形能力显著下降;相比橡胶沥青和 SBS 改性沥青,自制高黏度改性沥青高温敏感性最弱,耐老化性能更强,高温抗变形能力更为优越。

(4)自制高黏度改性沥青的低温抗裂性能较好,但与 SBS 改性沥青相比,其低温分级变化不显著,下一步将对自制材料性能进行优化调试,改善沥青的低温柔性。

参考文献:

References:

[1] DRAKE J A P, BRADFORD A, MARSALEK J. Review of environmental performance of permeable pavement systems: State of the knowledge[J]. Water Quality Research Journal of Canada, 2013, 48(3): 203-222.

[2] 曹东伟,刘清泉,唐国奇.排水沥青路面[M].北京:人民交通出版社,2010.  
CAO Dong-wei, LIU Qing-quan, TANG Guo-qi. Porous asphalt pavement[M]. Beijing: China Communications Press, 2010.

[3] DIETZ M E, ANGEL D R, ROBBINS G A, et al. Permeable asphalt: A new tool to reduce road salt contamination of groundwater in urban areas[J]. Groundwater, 2017, 55(2): 237-243.

[4] JIANG W, SHA A, XIAO J, et al. Experimental study on filtration effect and mechanism of pavement runoff in permeable asphalt pavement[J]. Construction and Building Materials, 2015, 100: 102-110.

[5] 王仕峰,马庆丰,李剑新.排水路面用高粘度改性沥青的研究与应用进展[J].石油沥青,2012,26(1):1-8.  
WANG Shi-feng, MA Qing-feng, LI Jian-xin. Study and application progress of high viscosity modified asphalt used in porous pavement[J]. Petroleum Asphalt, 2012, 26(1): 1-8.

[6] HUSSEIN A A, JAYA R P, HASSAN N A, et al. Performance of nanoceramic powder on the chemical and physical properties of bitumen[J]. Construction and Building Materials, 2017, 156: 496-505.

[7] XIONG R, CHEN S F, GUAN B W, et al. Laboratory investigation of brucite fiber in stabilizing and reinfor-

- cing asphalt binder[J]. International Journal of Pavement Research & Technology, 2014, 7(4): 256-262.
- [8] ZHANG F, HU C. Preparation and properties of high viscosity modified asphalt[J]. Polymer Composites, 2017, 38(5): 936-946.
- [9] 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 & Calorimetry, 2018, 131(2): 1025-1034.
- [10] CONG P, XU P, CHEN S. Effects of carbon black on the anti-aging, rheological and conductive properties of SBS/asphalt/carbon black composites [J]. Construction and Building Materials, 2014, 52 (2): 306-313.
- [11] WU S P, ZHANG W, ZHU Z H, et al. Effect of zeolite 4A on the aging and rheological properties of SBS asphalt binders[C]//The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics. Conference Program for the 3rd International Conference on Heterogeneous Materials Mechanics. Beijing: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2011: 659-662.
- [12] ALAM S, HOSSAIN Z. Changes in fractional compositions of PPA and SBS modified asphalt binders[J]. Construction and Building Materials, 2017, 152: 386-393.
- [13] WANG L, WANG Z, LI C. Low temperature performance of polyphosphoric acid asphalt and polyphosphoric acid-SBS modified asphalt[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(2): 329-335.
- [14] WEI Y, GUO R, YAN F, et al. Evaluation of low temperature performances of SBS+PPA compound modifying asphalt by force ductility test[C]//ICISMME. International Conference on Information Sciences, Machinery, Materials and Energy. Paris: Atlantis Press, 2015: 1-13.
- [15] ZHAO Z, WU S, LIU Q. Investigation of the effect of layer double hydroxides on comprehensive properties of SBS-modified asphalt mixture [J]. Material Research Innovations, 2016, 19(S5): 764-768.
- [16] 丛玉凤, 徐磊, 黄玮, 等. SBS-C<sub>9</sub> 石油树脂改性沥青的研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(3): 602-605.
- CONG Yu-feng, XU Lei, HUANG Wei, et al. Study on modification of asphalt by SBS-C<sub>9</sub> petroleum resin [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19 (3): 602-605.
- [17] 钱春香, 解建光, 王鸿博. 接枝 SBS 改性沥青的制备及性能[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2005, 35(3): 404-408.
- QIAN Chun-xiang, XIE Jian-guang, WANG Hong-bo. Preparation and properties of grafting SBS modified asphalt[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2005, 35(3): 404-408.
- [18] 陈瑶, 谭忆秋, 陈克群. TPS 改性剂对高粘沥青性能的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(6): 82-85.
- CHEN Yao, TAN Yi-qiu, CHEN Ke-qun. Effect of TPS modifier on the properties of high-viscosity asphalt[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(6): 82-85.
- [19] 王笑风, 曹荣吉. 橡胶沥青的改性机理[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(2): 6-11.
- WANG Xiao-feng, CAO Rong-ji. Rubber asphalt modification mechanism[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(2): 6-11.
- [20] WANG T, XIAO F, AMIRKHANIAN S, et al. A review on low temperature performances of rubberized asphalt materials[J]. Construction and Building Materials, 2017, 145: 483-505.
- [21] AS TP1-1999. Washington standard test method for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR) [S].
- [22] DONG F, YU X, LIU S, et al. Rheological behaviors and microstructure of SBS/CR composite modified hard asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2016, 115: 285-293.
- [23] 王超. 沥青结合料路用性能的流变学研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
- WANG Chao. Rheological characterization on paving performance of asphalt binder [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.
- [24] 谭忆秋, 王佳妮, 冯中良, 等. 沥青结合料紫外老化机理[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 19-24.
- TAN Yi-qiu, WANG Jia-ni, FENG Zhong-liang, et al. Ultraviolet aging mechanism of asphalt binder[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21 (1): 19-24.
- [25] 栾自胜, 雷军旗, 屈仆. SBS 改性沥青低温性能评价方法[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(2): 15-18.
- LUAN Zi-sheng, LEI Jun-qi, QU Pu, et al. Evaluation methods of SBS modified-asphalt binders[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32 (2): 15-18.