

文章编号:1672-9331(2020)02-0001-09

胶粉/高黏剂复合改性 SBS 沥青的性能与改性机理

周志刚,陈功鸿,张红波,凌永毅

(长沙理工大学 道路结构与材料交通行业重点实验室,湖南 长沙 410114)

摘 要:通过添加胶粉和高黏剂对 SBS 改性沥青进行复合改性。采用基本物理指标研究高黏改性沥青的制备工艺;采用软化点差值法评价高黏改性沥青的热储存稳定性;采用动态剪切流变试验(DSR)研究高黏改性沥青的高温流变性能和中温抗疲劳性能;借助傅里叶红外光谱(FTIR)和差示扫描量热法(DSC)对高黏改性沥青的改性机理进行分析。基本物理试验结果表明:胶粉有助于提高改性沥青的高温性能,但对其低温性能有不利影响,高黏剂能够大幅度提高改性沥青的黏度,最佳的胶粉掺量和三种高黏剂的掺量分别为:10%、8%、7%、8%。离析试验结果表明:三种高黏改性沥青的热储存稳定性满足规范要求。DSR 试验结果表明:胶粉和高黏剂有助于提高成品 SBS 沥青的高温性能和感温性能;短期老化后,其高温性能提高,但对感温性能产生不利影响;胶粉和高黏剂的掺入提高了沥青的中温抗疲劳性能。FTIR 结果表明:胶粉和高黏剂与 SBS 沥青之间既存在物理共混,也有化学反应的发生。DSC 结果表明:通过高黏复合改性后,沥青的高温稳定性得到有效提高。

关键词:胶粉;高黏剂;复合改性;高温性能;抗疲劳性能;改性机理

中图分类号:U414

文献标识码:A

Performance and modification mechanism of SBS composite modified asphalt by rubber powder/high viscosity agent

ZHOU Zhi-gang, CHEN Gong-hong, ZHANG Hong-bo, LING Yong-yi

(Key Laboratory of Road Structure and Materials Transportation Industry, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The SBS modified asphalt was modified by both rubber powder and high viscosity agent. The preparation process of high viscosity modified asphalt was studied by basic physical indexes. The thermal storage stability of high viscosity modified asphalt was studied by the softening point difference method. High temperature rheological properties and medium temperature anti-fatigue of high viscosity modified asphalt were studied by Dynamic Shear Rheological (DSR) test. The modification mechanism of high viscosity modified asphalt was analyzed by Fourier Transform Infra-Red (FTIR) and Differential Scanning Calorimetry (DSC). The results of basic physical experiments show that rubber powder can improve the high temperature performance of modified asphalt, but it has adverse effect on its low tem-

收稿日期:2019-11-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878079);湖南省交通科技计划项目(201807)

通讯作者:周志刚(1966—),男,湖南长沙人,长沙理工大学教授,主要从事道路工程结构设计理论与方法、路面材料与施工技术等方面的研究。E-mail:zhou_zgcs@sina.com

perature performance. High viscosity agent can greatly improve the viscosity of modified asphalt. The optimum contents of rubber powder and three kinds of high viscosity agents are 10%, 8%, 7% and 8% respectively. The results of segregation test show that the thermal storage stability of three kinds of high viscosity modified asphalt meets the requirements of the specification. DSR test results show that rubber powder and high viscosity agent can improve the high temperature performance and temperature sensitivity of the SBS asphalt. After short-term aging, the high temperature performance of SBS asphalt is improved, but it has adverse effect on temperature sensitivity. The addition of rubber powder and high viscosity agent improves the medium temperature anti-fatigue of asphalt. FTIR results show that there are physical blending and chemical reaction between rubber powder, high viscosity agent and SBS asphalt. DSC results show that the high temperature stability of asphalt is improved effectively through high viscosity composite modification.

Key words: rubber powder; high viscosity agent; composite modification; high temperature performance; anti-fatigue performance; modification mechanism

SBS 改性沥青具有优异的高温抗车辙性能及良好的低温抗裂性,是目前公路建设的主要沥青材料之一。但随着排水性沥青路面在“海绵城市”建设项目中的广泛应用,SBS 改性沥青已无法满足排水性路面对沥青黏度、高温稳定性及抗水损害性的需求。高黏度改性剂能够大幅提高沥青的 60 °C 动力黏度和高温性能。目前常用的高黏度改性剂有日本大有公司生产的 TPS(TAFPACK-Super),交通部公路科学研究院研制的 PA-T 型添加剂(HVA),深圳海川的 SINOTPS 等,但这类高黏改性剂都价格昂贵,使得高黏改性沥青的改性成本居高不下。本研究根据我国废旧轮胎产量巨大且逐年增多的基本状况,采用废胶粉和国产高黏剂对成品 SBS 沥青进行改性,既使得改性沥青的性能能够满足排水性沥青路面的使用要求,又能实现废旧轮胎“变废为宝”,起到绿色、环保作用,还能大大降低高黏改性沥青的改性成本。

目前国内外在 SBS 改性沥青与其它改性剂的复合改性方面的研究主要有:吉泽中等^[1]研究了橡胶粉掺量对橡胶粉/SBS 复合改性沥青高、低温性能及抗老化性能的影响;Liu 等^[2]研究了 SBS/橡胶粉复合改性沥青的针入度、软化点、延度和弹性恢复性能随 SBS 和橡胶粉掺量的增加而变化的趋势;黄卫东等^[3]对 TB+SBS 复合改性沥青的抗疲劳和高温性能进行了研究;刘勇等^[4]、周艳等^[5]借助荧光显微镜、红外光谱等微观手段对胶粉/

SBS 复合改性沥青的改性机理进行了研究;杨凯等^[6]对 SBS 与 SBR 胶粉复合改性沥青的性能进行了研究;符刘旭^[7]研究了橡胶粉和 TPS 增黏剂掺量对 SBS 改性沥青物理性能的影响规律;杜宇兵等^[8]根据三大指标、135 °C 旋转黏度和弹性恢复等指标对橡胶粉/高黏剂复合改性沥青的高、低温性能及弹性恢复性能进行了研究,结果表明其性能优于单一改性沥青和 SBS 改性沥青;Han 等^[9]通过接枝技术对胶粉、十二烷基胺和 SBS 改性沥青进行复合改性,多角度对其性能进行了研究。

国内外对此类改性沥青的改性机理和抗疲劳性能缺乏研究。因此,本研究通过胶粉和高黏剂对 SBS 沥青进行复合改性,采用动态剪切流变试验(DSR)、傅里叶红外光谱(FTIR)和差示扫描量热法(DSC)对复合改性沥青的高温流变性能及改性机理进行研究,可为我国高黏改性沥青的研究提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

成品 SBS(I-D)改性沥青为市售,其性能指标如表 1 所示。橡胶粉采用 100 目橡胶粉,由广西交通科学研究院生产提供,其物理指标和化学指标如表 2 和表 3 所示。三种高黏剂(A、B、C)由深圳弘路新材料有限公司生产提供,其外观形貌见图 1。

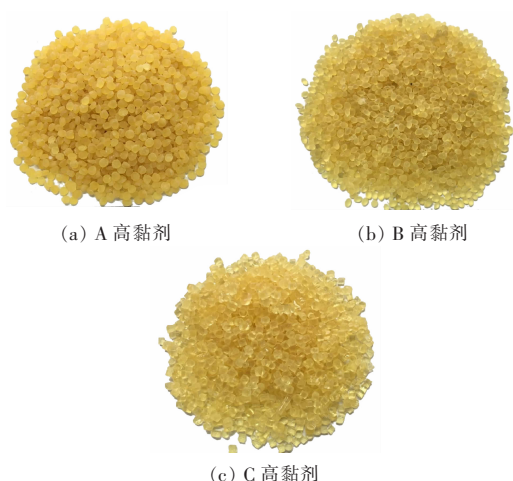


图 1 三种高黏剂的外观形貌

Fig. 1 Appearance of three kinds of high viscosity agent

表 1 成品 SBS(I-D)改性沥青检测结果

Table 1 Testing results of finished SBS (I-D) modified asphalt

测试项目	技术要求	检测结果	试验方法
针入度(25 ℃, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	40~60	58.5	T0604
针入度指数 PI	≥ 0	0.11	T0604
延度(5 ℃, 5 cm/min)/cm	≥ 20	30.02	T0605
软化点/℃	≥ 60	86.0	T0606
135 ℃布氏黏度/(Pa·s)	≤ 3	2.26	T0625

表 2 路用废胎胶粉的物理技术标准

Table 2 Physical technical standards of waste rubber powder for road use

检测项目	技术要求	技术规范
筛余物	$< 10\%$	GB/T 19208
相对密度	1.10~1.30	JT/T 797
含水率	$< 1.0\%$	GB/T 19208
金属含量	$< 0.03\%$	JT/T 797
纤维含量	$< 0.5\%$	GB/T 19208

表 3 路用废胎胶粉的化学技术标准

Table 3 Chemical technical standards of waste rubber powder for road use

检测项目	技术要求	技术规范
灰分	$\leq 8\%$	GB/T 4498
天然橡胶含量	$\geq 30\%$	—
丙酮抽出物	$\leq 14\%$	GB/T 3516
炭黑含量	$\geq 28\%$	GB/T 14837
橡胶烃含量	$\geq 48\%$	GB/T 14837

1.2 制备工艺

1) 胶粉改性 SBS 沥青。

加热成品 SBS 沥青至 180 ℃,将胶粉分批多次加入沥青中,在加入过程中用玻璃棒不断搅拌,使胶粉在沥青中分散均匀;然后以 3 000 r/min 剪切 30 min,至胶粉充分溶胀;最后将制备的沥青置于 150 ℃烘箱中发育 30 min,并且每隔 10 min 左右搅拌一次。

2) 高黏改性沥青。

将成品 SBS 沥青加热至 150 ℃熔化,加入高黏剂,用玻璃棒搅拌均匀后置于 150 ℃的烘箱中溶胀 2 h,并且每隔 10 min 左右搅拌一次,取出沥青后在 150 ℃下以 3 000 r/min 的速率剪切 1 h;然后将沥青温度提升至 180 ℃,分批多次加入胶粉,用玻璃棒搅拌均匀后以 3 000 r/min 的速率剪切 30 min 至完全溶于沥青;最后将制备的沥青置于 150 ℃烘箱中发育 30 min,并且每隔 10 min 左右搅拌一次。

1.3 试验方法

1) 物理性能试验。

依据沥青与沥青混合料试验规程^[10]规定的试验方法,分别测试胶粉改性 SBS 沥青和高黏改性沥青的针入度、软化点、延度、针入度指数、60 ℃动力黏度等指标。针入度能够反映沥青的相对黏度,表征沥青在常温状态下的抗变形能力;软化点是评价沥青高温性能的指标之一;延度用以评价沥青的低温性能;针入度指数能反映沥青的感温性能;60 ℃动力黏度是高黏度改性沥青的重要性能指标。

2) 热储存稳定性试验。

我国规范^[10,11]规定,采用软化点差值法来评价改性沥青热储存稳定性,上下软化点差值不允许超过 2.5 ℃。本研究按照规范提供的试验方法,对按最佳改性剂掺量制备的三种高黏改性沥青进行离析试验。试验温度为 163 ℃,储存时间为 0,6,12,24,48,72 h,分别检测每个储存时间后的上下各 1/3 部分处沥青的软化点,并求其差值,以此评价沥青的热储存稳定性。

3) 高温流变性能试验。

参考 AASHTO 试验规程^[12],本研究采用动态剪切流变仪(DSR)对胶粉改性 SBS 沥青和最佳

掺量的高黏改性沥青测试。试验温度从 40 ℃ 开始,每隔 1 ℃ 扫描一次,其剪切速率为 10 r/s,应变水平为 12% 或 10%。本研究通过 DSR 的试验扫描结果,采用复数剪切模量 G^* 、损耗因子 $\tan\delta$ 评价沥青的流变性能。

4) 疲劳性能试验。

本研究按照沥青与沥青混合料试验规程规定的试验方法对改性沥青进行长期老化,再采用 DSR 进行中温疲劳试验。DSR 试验温度从 28 ℃ 开始,每降低 3 ℃ 为一个中温等级,直到 $G^* \sin\delta > 5\,000$ kPa 停止,中温疲劳失效温度为 $G^* \sin\delta = 5\,000$ kPa 时对应的试验温度。本试验采用的剪切速率为 10 r/s,应变水平为 1%,高黏改性沥青根据其最佳改性剂掺量制备。

5) 微观试验。

通过确定的最佳改性剂掺量制备高黏改性沥青。利用 Bruker Tensor 红外光谱仪测试分析加入各改性剂后沥青中官能团和分子结构的变化,利用差示扫描量热法(DSC)热分析技术研究沥青

在温度变化时其内部组分相态结构的变化,从而揭示各种改性剂对成品 SBS 沥青的改性机理^[13]。

2 试验结果与分析

2.1 胶粉掺量的确定

由表 4 可知,随着胶粉掺量的逐渐增加,SBS 改性沥青的 15 ℃ 针入度、25 ℃ 针入度及 30 ℃ 针入度都呈减小的趋势,其软化点不断提高。当胶粉掺量从 0 提高到 7% 时,SBS 改性沥青的 5 ℃ 延度显著减小,其温度敏感性提高,然后随着胶粉掺量的再次增加,其 5 ℃ 延度略有减小,但其温度敏感性几乎无变化。而当胶粉掺量超过 10% 后,其 15 ℃ 延度有大幅度减小。SBS 改性沥青经过胶粉改性后,其 60 ℃ 动力黏度呈先增加后减小的规律,在胶粉掺量为 10% 时,黏度达到最大值。这主要是由于胶粉掺量过高,导致其溶胀不充分,反而抑制了改性沥青的黏度增长。综合考虑复合改性沥青的各物理指标,其最优的胶粉掺量为 10%。

表 4 成品 SBS 沥青与不同掺量胶粉复合改性测试指标

Table 4 Testing indexes of composite modification of finished SBS asphalt with different content rubber powder

掺量/ %	针入度(100 g, 5 s)/(0.1 mm)			软化点/ ℃	延度(5 ℃, 1 cm/min)/cm	延度(15 ℃, 5 cm/min)/cm	PI	60 ℃ 动力黏 度/(Pa·s)
	15 ℃	25 ℃	30 ℃					
0	22.9	58.5	88.4	85.8	45.66	99.74	0.118	181 493
7	22.7	46.8	66.4	86.5	29.95	48.94	1.742	194 431
10	22.2	45.9	64.9	86.9	29.71	48.15	1.742	257 137
13	22.0	45.0	64.4	87.5	29.00	42.75	1.742	164 468
16	21.9	44.5	64.0	88.2	28.62	41.34	1.765	120 068

2.2 高黏剂掺量的确定

成品 SBS 沥青经过胶粉改性后,虽然 60 ℃ 动力黏度已超过交通量和重载交通状态下的道路沥青黏度要求值 1×10^5 Pa·s,但其软化点和延度指标偏低,仍有性能提升的空间。因此,本试验在胶粉掺量为 10% 的基础上,分别添加三种不同的高黏剂 A、B、C 进行复合改性,最终确定每种高黏剂的最佳掺量,并对比评价三种高黏度复合改性沥青的性能优劣。

由图 2~7 可知,掺入高黏剂后,改性沥青的软化点、延度、针入度指数和 60 ℃ 动力黏度指标都得到了大幅度提高,25 ℃ 针入度指标降低,但下降的幅度不大,表明高黏剂和成品 SBS 沥青有很

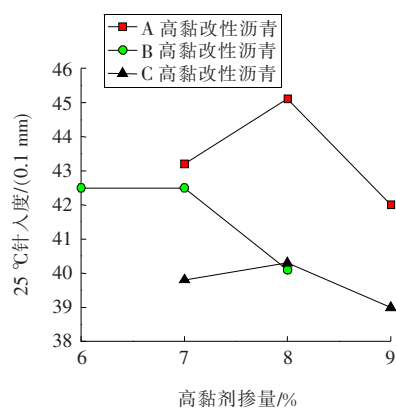


图 2 各高黏改性沥青 25 ℃ 针入度

Fig. 2 Penetration(25 ℃) of each high viscosity modified asphalt

好的相容性,全面提升了 SBS 沥青的性能。随着高黏剂掺量的增加,三种高黏沥青的针入度、延度、针入度指数均呈现先增加后减小的规律,A、C 高黏剂掺量为 8% 时出现最大值,而 B 高黏剂在掺量为 7% 时达到最大值,三种沥青高黏改性后,其它物理性能指标值均呈逐渐增加的趋势,177 °C 布氏黏度小于 3.0 Pa·s,能够满足施工和易性的要求。

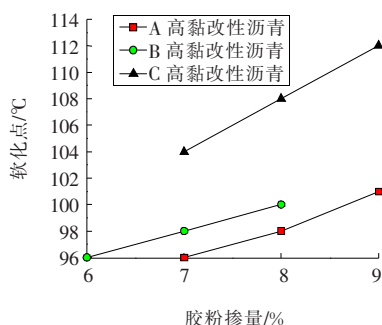


图 3 各高黏改性沥青软化点

Fig. 3 Softening point of each high viscosity modified asphalt

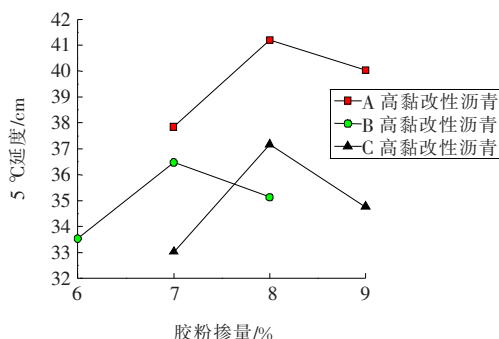


图 4 各高黏改性沥青 5 °C 延度

Fig. 4 Ductility(5 °C) of each high viscosity modified asphalt

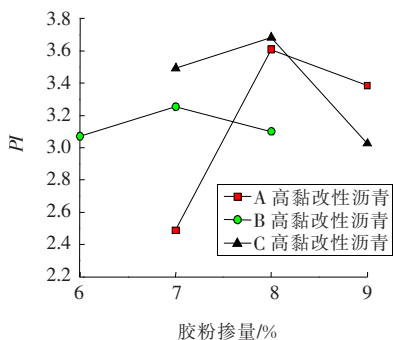


图 5 各高黏改性沥青 PI 值

Fig. 5 PI value of each high viscosity modified asphalt

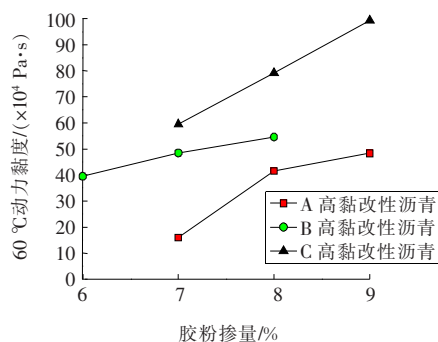


图 6 各高黏改性沥青 60 °C 动力黏度

Fig. 6 Dynamic viscosity(60 °C) of each high viscosity modified asphalt

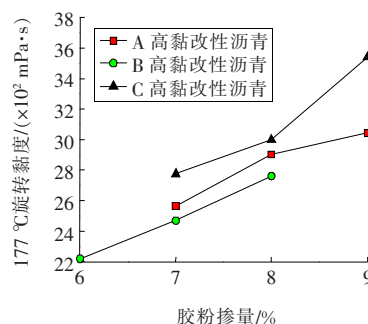


图 7 各高黏改性沥青 177 °C 旋转黏度

Fig. 7 Rotational viscosity(177 °C) of each high viscosity modified asphalt

对比三种高黏沥青的各指标性能可知,C 高黏沥青的软化点、60 °C 动力黏度、针入度指数和 177 °C 布氏黏度指标最大,25 °C 针入度和延度指标最小,表明 C 高黏改性沥青高温稳定性和温度敏感性最好、黏度最大;A 高黏改性沥青的针入度和延度指标最大,而软化点最小,表明 A 高黏改性沥青的低温性能最好;B 高黏改性沥青的物理性能指标与 A 高黏改性沥青较接近。综上所述,A、B、C 高黏剂的最佳掺量分别为 8%、7%、8%。

2.3 热储存稳定性

由图 8 可知,随着储存时间的增加,三种高黏改性沥青的软化点差值逐渐增大,当储存时间小于 12 h 时,软化点差值的增长速率较大,而后增长速率逐渐减小并趋于稳定。在 48 h 储存时间内,三种高黏改性沥青的软化点差值均小于 2.5 °C,满足规范要求。三种高黏改性沥青的软化点差值大小排序为:A 高黏改性沥青>B 高黏改性沥青>C 高黏改性沥青。因此,C 高黏改性沥青的热储存

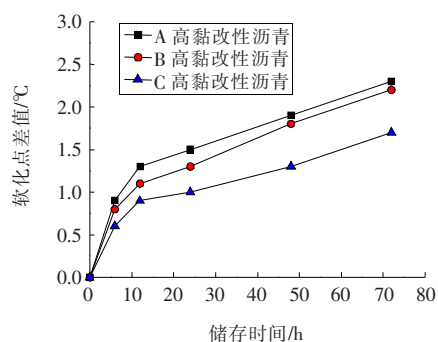


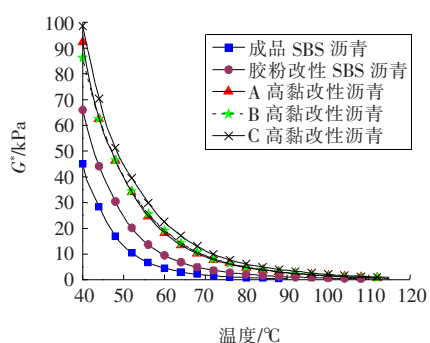
图8 高黏改性沥青软化点差值

Fig. 8 Differences of softening point of high viscosity modified asphalt

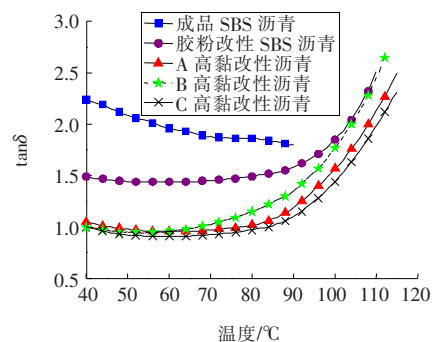
稳定性最优,B高黏改性沥青次之,C高黏改性沥青的热储存稳定性最差。

2.4 高温流变性能

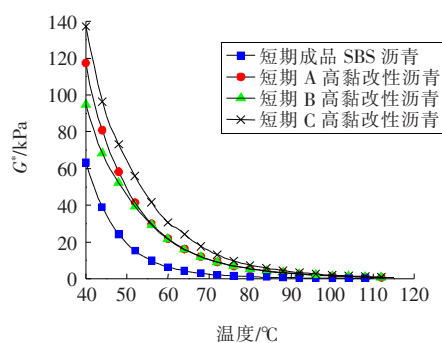
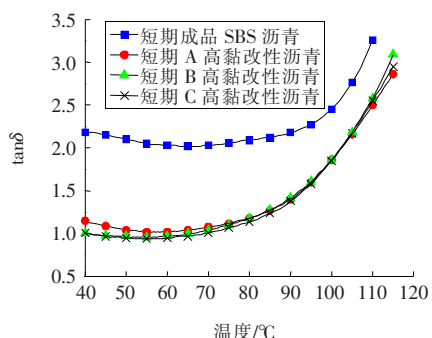
由图9可知,成品SBS沥青经过胶粉改性后,其复数模量 G^* 增大,表明其高温性能得到有效提高;当掺入高黏剂后,其复数模量 G^* 进一步增大,表现出更好的高温性能。对比三种高黏改性沥青,C高黏改性沥青的高温性能最好。

图9 老化前各沥青 G^* 温度扫描结果Fig. 9 Temperature scanning results of G^* values of asphalts before aging

由图10可知,随着温度的逐渐升高,高黏改性沥青的损耗因子呈现增大的趋势,说明高温对高黏改性沥青的力学性能有不利影响。成品SBS沥青的损耗因子随温度变化的规律与此相反,但变化的幅度不大。随着胶粉和高黏剂的分别掺入,改性沥青的损耗因子逐步减小,说明胶粉和高黏剂在SBS沥青中形成稳定的内部结构,降低其对温度的敏感性。对比三种高黏改性沥青,C高黏改性沥青具有最好的感温性能。

图10 老化前各沥青 $\tan\delta$ 温度扫描结果Fig. 10 Temperature scanning results of $\tan\delta$ values of asphalts before aging

由图11可知,高黏改性沥青经短期老化后,其复数模量均有显著增强,说明短期老化使得沥青的流动性变差,沥青变硬。由图12可知,短期老化后,其损耗因子均有所增大,特别是高温部分表现出明显的增大趋势,说明短期老化后沥青的力学损耗增大,对温度更为敏感。

图11 短期老化后各沥青 G^* 温度扫描结果Fig. 11 Temperature scanning results of G^* values of asphalts after short-term aging图12 短期老化后各沥青 $\tan\delta$ 温度扫描结果Fig. 12 Temperature scanning results of $\tan\delta$ values of asphalts after short-term aging

2.5 抗疲劳性能

由图13可知,随着温度的逐渐降低,高黏改性沥青的疲劳因子逐步增大,说明温度越低,沥青

越容易产生疲劳破坏。在图中 4 种沥青中,A 高黏改性沥青和 B 高黏改性沥青的中温疲劳等级均为 16 ℃,C 高黏改性沥青的中温疲劳等级为 19 ℃,成品 SBS 沥青的中温疲劳等级为 22 ℃。因此,4 种沥青的中温疲劳性能强弱排序为: $A > B > C > \text{成品}$,胶粉和高黏剂的掺入提高了沥青的中温抗疲劳性能。

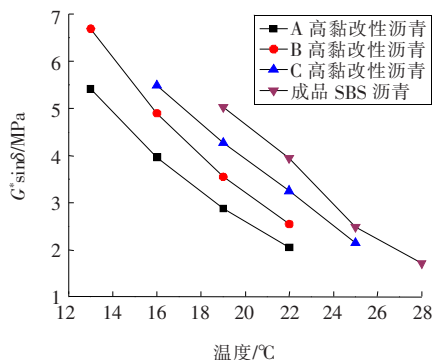


图 13 高黏改性沥青疲劳因子对比图

Fig. 13 Fatigue factor comparison chart of the high viscosity modified asphalt

2.6 微观机理分析

1) FTIR。

由图 14 可知,胶粉改性 SBS 沥青的红外光谱图与成品 SBS 沥青的基本相同,而在 $2\,356\text{ cm}^{-1}$ 处多了一个弱吸收峰,这是胶粉谱图中该处官能团吸收峰叠加的结果,说明成品 SBS 沥青与胶粉共混并未产生新的官能团。胶粉谱图中 $3\,500\sim 3\,100\text{ cm}^{-1}$ 和 $2\,028\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰并未出现在胶粉改性 SBS 沥青的谱图中,说明胶粉掺入成品 SBS 沥青中发生了明显的化学键断裂的反应。因此,胶粉与成品 SBS 沥青既存在物理反应,又有化学反应。

由图 15~17 可知,对比 A 高黏改性沥青和胶粉改性 SBS 沥青,A 高黏改性沥青谱图在 $2\,356\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰消失,在 765 cm^{-1} 处的吸收峰增强,其它吸收峰基本相同。A 高黏剂谱图中 $3\,500\sim 3\,100, 2\,356, 2\,028\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰并未出现在 A 高黏改性沥青的谱图中,其它特征峰均得到叠加或减弱。因此,胶粉改性 SBS 沥青和 A 高黏剂共混过程中的化学反应以化学键的断裂为主,新官能团的产生较少,同时存在物理反应。B 高黏改性沥青和 C 高黏改性沥青的改性机理与 A 高黏改性沥青类似,但 C 高黏剂掺入没有官能团产生。

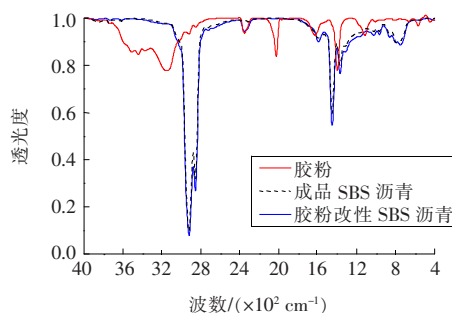


图 14 胶粉改性 SBS 沥青红外透射率谱

Fig. 14 Infrared transmittance spectrum of rubber powder modified SBS asphalt

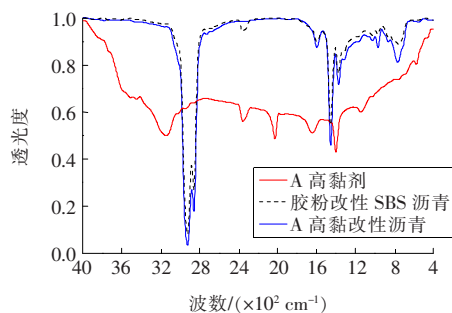


图 15 A 高黏改性沥青红外透射率谱

Fig. 15 Infrared transmittance spectrum of A high viscosity modified asphalt

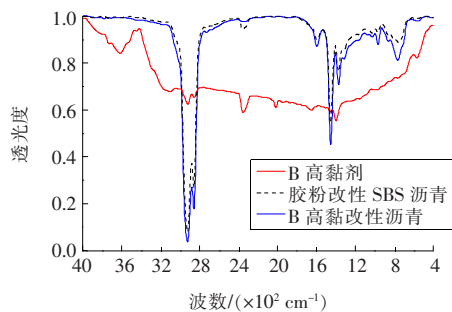


图 16 B 高黏改性沥青红外透射率谱

Fig. 16 Infrared transmittance spectrum of B high viscosity modified asphalt

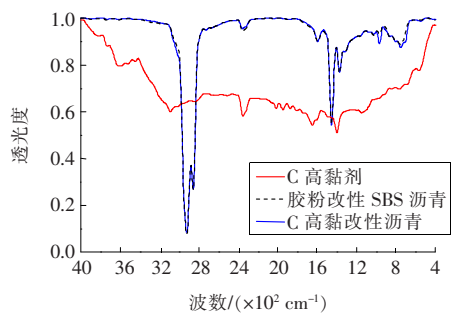


图 17 C 高黏改性沥青红外透射率谱

Fig. 17 Infrared transmittance spectrum of C high viscosity modified asphalt

2) DSC。

由图 18 可知,胶粉改性 SBS 沥青相比于成品 SBS 沥青,吸热量减小,但在 180 °C 后逐渐略高于成品 SBS 沥青,说明胶粉的掺入可有效提高成品 SBS 沥青的高温热稳定性,但在胶粉改性 SBS 沥青中仍存在未完全反应的胶粉颗粒,在超高温下继续吸热发生相态转变,造成了吸热量增大。随着高黏剂的掺入,高黏改性沥青的热流值均低于胶粉改性 SBS 沥青的热流值,说明高黏剂进一步提高了成品 SBS 沥青的热稳定性。对比三种高黏改性沥青的热流值可得,C 高黏改性沥青的热稳定性最好。

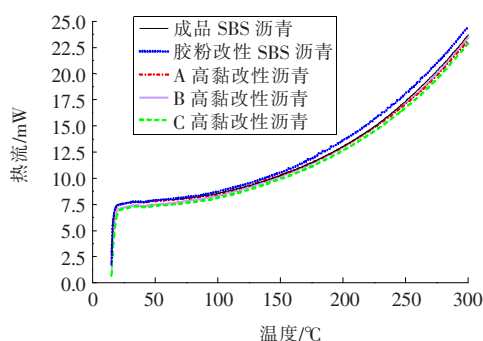


图 18 各改性沥青热流曲线图

Fig. 18 Heat flow curve of each modified asphalt

3 结论

1) 成品 SBS 沥青掺入胶粉后,其高温性能有所提高,并且改性沥青的感温性能得到改善,但对其低温性能有不利影响;高黏剂能够大幅度提高改性沥青的 60 °C 动力黏度。经正交试验结果确定:最佳的胶粉掺量及 A、B、C 三种高黏剂的掺量分别为 10%、8%、7%、8%。

2) A、B、C 三种高黏改性沥青 48 h 储存时间内的软化点差值均小于 2.5 °C,说明三种高黏改性沥青的热储存稳定性均满足规范要求,其热储存稳定性大小排序为:C 高黏改性沥青>B 高黏改性沥青>A 高黏改性沥青。

3) 成品 SBS 沥青经过胶粉和高黏剂改性后,其高温性能明显提高,并对感温性能有所改善;短期老化后,高黏改性沥青的高温稳定性增强,但对

其感温性能产生了不利影响;另外,胶粉和高黏剂的掺入有助于提高 SBS 沥青的中温抗疲劳性能。

4) 通过分析加入各改性剂后沥青中官能团和分子结构的变化,发现胶粉和高黏剂与 SBS 沥青之间既存在物理共混,也有化学反应的发生。

5) 通过比较分析各改性沥青随温度升高的热流变化,发现通过高黏复合改性后,沥青的高温稳定性得到有效提高。对比三种高黏改性沥青的热流值可知,C 高黏改性沥青的热稳定性最好。

〔参考文献〕

- [1] 吉泽中,刘嘉伟,徐凯. 橡胶/SBS 复合改性沥青及其混合料性能研究[J]. 新型建筑材料,2018,45(4): 124-128,132.
JI Ze-zhong, LIU Jia-wei, XU Kai. Study on properties of CR/SBS composite modified asphalt and mixtures[J]. New Building Materials, 2018, 45(4): 124-128, 132.
- [2] Liu L, Liu Z H, Li S. The preparation technology and performance study of SBS and rubber powder composite modified asphalt[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 361: 1 617-1 620.
- [3] 黄卫东,吕泉,柴冲冲. TB+SBS 复合改性沥青的性能[J]. 建筑材料学报,2016,19(3):522-527.
HUANG Wei-dong, LV Quan, CHAI Chong-chong. Performance of TB + SBS composite modified asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(3): 522-527.
- [4] 刘勇,顾兴宇,李志刚,等. 胶粉/SBS 复合改性沥青性能评价及改性机理[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2019,40(1):113-118.
LIU Yong, GU Xing-yu, LI Zhi-gang, et al. Performance evaluation and modification mechanism of rubber/SBS composite modified asphalt[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2019, 40(1): 113-118.
- [5] 周艳,黄卫东,林鹏,等. 溶解性胶粉改性沥青与 SBS 的交联反应研究[J]. 建筑材料学报,2018,21(1): 54-59.
ZHOU Yan, HUANG Wei-dong, LIN Peng, et al. Cross-linking investigation of terminal blend rubberized asphalt with SBS[J]. Journal of Building Materi-

- als, 2018, 21(1): 54-59.
- [6] 杨凯, 邢明亮, 田俊壮, 等. SBS 与 SBR 胶粉复合改性沥青性能研究[J]. 公路, 2016, 61(10): 206-211.
YANG Kai, XING Ming-liang, TIAN Jun-zhuang, et al. Research on performance of SBS and SBR powder composite modified asphalt [J]. Highway, 2016, 61(10): 206-211.
- [7] 符刘旭. 高黏改性型透水沥青混合料路用性能及声发射特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
FU Liu-xu. Study on road performance and acoustic emission characteristics of high viscosity modified pervious asphalt mixture[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [8] 杜宇兵, 邹晓翎, 柴明明. 橡胶粉/高黏剂复合改性沥青制备研究[J]. 公路, 2017, 62(8): 228-233.
DU Yu-bing, ZOU Xiao-ling, CHAI Ming-ming. Study on preparation of modified asphalt by rubber powder and high viscosity modifier composite[J]. Highway, 2017, 62(8): 228-233.
- [9] Han M Z, Zeng X, Yaseen M, et al. Preparation of OctaDecyl Amine grafted over Waste Rubber Powder (ODA-WRP) and properties of its incorporation in SBS-modified asphalt[J]. Polymers, 2019, 11(4): 1-21.
- [10] JTG F20-2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
JTG F20-2011, Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [11] JTG F40-2004, 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
JTG F40-2004, Technical specification for construction of highway asphalt pavements[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [12] AASHTO-T 315, Standard method of test for determining the rheological properties of asphalt binder using a Dynamic Shear Rheometer (DSR) [S]. USA: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2016.
- [13] 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.
SUN Min, ZHENG Mu-lian, BI Yu-feng, et al. Modification mechanism and performance of polyurethane modified asphalt[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(2): 49-58.