

文章编号:1007-9629(2023)09-0996-07

相容剂组成对 SBS 改性沥青抗老化性能的影响

王诗雨¹, 董夫强^{1,*}, 于新^{1,2}, 祖元哲¹, 姜阳¹

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098;

2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:以不同组成的相容剂制备了 SBS 改性沥青样品,通过常规性能试验、动态剪切流变试验、荧光显微镜评价了其老化前后的性能及微观结构的变化情况。结果表明:相容剂中芳香分含量越高,改性沥青的高温性能越好,而饱和分含量越高,改性沥青的低温性能越好;老化后,相容剂中芳香分含量越高,其改性沥青各项性能变化幅度越小,抗老化性能越好,反之饱和分含量越高其抗老化性能越差;微观相态结构发生了明显的聚集现象,饱和分含量越多,聚集越严重,颗粒粒径越大,体系由 SBS 和沥青双连续相变为 SBS 为分散相、沥青为连续相。

关键词:改性沥青;相容剂组成;抗老化性能;微观结构

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.09.007

Influence of Compatibilizer Composition on Anti-aging Properties of SBS Modified Asphalt

WANG Shiyu¹, DONG Fuqiang^{1,*}, YU Xin^{1,2}, ZU Yuanzhe¹, JIANG Yang¹

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Traffic and Transport Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: SBS modified asphalt samples were prepared using compatibilizers with different compositions. The changes in performance and microstructure before and after aging were evaluated by conventional performance tests, dynamic shear rheology tests and fluorescence microscopy. The results show that the higher the aromatic content in the compatibilizer, the better the high temperature properties of the modified asphalt, while the higher the saturate content, the better the low temperature performance of the modified asphalt. After aging, the higher the aromatic content in the compatibilizer, the smaller the variability in the various properties of the modified asphalt, and the better the anti-aging properties. Conversely, the higher the saturate content, the worse the anti-aging properties. Meanwhile, the microstructure shows a distinct aggregation phenomenon. The higher the saturate content, the more severe the aggregation and the larger the particle size. The system changes from double continuous phase structure to the SBS phase as the dispersed phase and the asphalt phase as the continuous phase.

Key words: modified asphalt; compatibilizer composition; anti-aging property; microstructure

当前,中国大部分沥青路面面临养护的问题,而养护工程具有沥青材料需长期储存、反复加热、养护拌和量小、施工零散分布、运输距离长等特点,进而对养护沥青性能提出了更高的要求^[1]。SBS 改性沥青

(SBSMA)因其优越的性能表现而被广泛应用于道路建养工程^[2-3],但是由于 SBS 改性沥青多相分散体系的热不稳定性,热存储 SBS 相易离析,即相分离^[4],使其不能很好地适应养护工程特点。学者们从 SBS

收稿日期:2022-11-12; 修订日期:2023-01-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278451)

第一作者:王诗雨(1998—),男,甘肃兰州人,河海大学硕士生。E-mail: wsy_0626@126.com

通讯作者:董夫强(1985—),男,山东济宁人,河海大学副教授,硕士生导师,博士。E-mail: dfq0107@126.com

种类、沥青油源、存储状态等方面通过宏观试验和微观技术手段对SBS改性沥青的相容性和抗老化性能开展了大量的研究。SBS与沥青成分、结构的差异将导致改性沥青热存储相分离^[5],热存储条件与空气浓度能够影响SBS的热降解程度^[6],提升相容性是改善SBS改性沥青抗老化性能的有效手段^[7]。SBS改性沥青的相态结构也对其性能有较大影响^[8],并与宏观性能存在对应关系^[9],然而从相容剂组成的角度探索SBS改性沥青抗老化性能的研究较少。

工业生产中普遍会添加2%~6%的相容剂以改善SBS改性沥青的相容性^[10]。但当前相容剂种类繁多,且对相容剂的使用存在误区,一味追求高芳香分含量,并没有充分掌握相容剂组成对SBS改性沥青性能的影响规律。因此,为了满足养护工程的要求,并探索相容剂组成对改性沥青抗老化性能的影响,本文调制了不同组成的相容剂样品,并研究了其制备的SBS改性沥青老化前后常规性能指标、流变特性和微观结构的变化情况。

1 试验

1.1 原材料

沥青采用韩国双龙90#沥青为基质沥青,其性能指标见表1。SBS改性剂采用岳阳巴陵石化公司的SBS1301-1,其性能指标见表2。

表1 基质沥青的性能指标

Table 1 Property indexes of base asphalt

Item	Result	Method
Softening point/°C	44.8	JTG E20—2011 T0606
Penetration(25 °C)/(0.1 mm)	92	JTG E20—2011 T0604
Ductility(25 °C)/cm	>150	JTG E20—2011 T0605
Aromatic content(by mass)/%	39.79	JTG E20—2011 T0905
Saturate content(by mass)/%	19.29	JTG E20—2011 T0905
Resin content(by mass)/%	34.91	JTG E20—2011 T0905
Asphaltene content(by mass)/%	6.01	JTG E20—2011 T0905

表2 SBS改性剂的性能指标

Table 2 Property indexes of SBS modifier

Item	Result
Melt index/(g·min ⁻¹)	6.0
Shore hardness	74
Elongation at break/%	700
Stretch strength/MPa	18
Styrene content(by mass)/%	30

1.2 不同组成相容剂的制备

相容剂为辽河石化的常压馏分油(富饱和分组分,A)和减线抽出油(富芳烃组分,F)。为了获得不同

组成的相容剂系列样品,将相容剂A、F按照不同比例混配得到相容剂B、C、D、E,并对其组成(质量分数,文中涉及的组成、掺量等均为质量分数)进行了测定,结果见表3。由表3可见,相容剂中基本不含沥青质,胶质含量相对较少,大部分为饱和分和芳香分,其含量大约在80.59%~93.72%;从相容剂A到F,其饱和分含量逐渐降低,芳香分含量升高。

表3 相容剂的组成

Table 3 Components of compatibilizers

Compatibilizer	w/%			
	Aromatic	Saturate	Resin	Asphaltene
A	15.23	65.36	18.50	0.91
B	22.98	60.01	16.45	0.56
C	32.02	54.22	13.36	0.40
D	46.54	40.70	12.38	0.38
E	55.93	33.21	10.37	0.31
F	72.02	21.70	6.06	0.22

1.3 SBS改性沥青的制备

首先,将基质沥青加热至175 °C,加入3.0%(以基质沥青的质量计)的相容剂,使用高速剪切机在2 000 r/min下剪切10 min,使相容剂与沥青混合均匀;接着,将其升温至180 °C,开始缓慢加入4.0%的SBS改性剂,在4 000 r/min下剪切30 min;然后,将温度降至170 °C,加入0.2%的稳定剂,搅拌2 h;最后,得到SBS改性沥青样品(SBSMA-X, X为相容剂),并分析其性质。

1.4 试验方法

为了考察相容剂组成对SBS改性沥青抗老化性能的影响规律,选用薄膜烘箱试验(TFOT)对SBS改性沥青的抗老化性能进行评价,具体试验条件为163 °C下老化5 h。采用软化点、25 °C针入度和5 °C延度等指标对SBS改性沥青老化前后的常规性能进行评价。通过动态剪切流变(DSR)试验和多应力重复蠕变试验,对比了其复数模量 G^* 、相位角 δ 、0.1 kPa下的蠕变回复率 R 和不可回复柔量 J_{ir} 。采用荧光显微镜对SBS改性沥青的微观结构进行了表征,其具体步骤可参照笔者前期的研究^[11]。

2 结果与讨论

2.1 常规性能

2.1.1 软化点

软化点通常用以表征沥青的高温性能,软化点越大,说明沥青高温稳定性越好,越不易产生塑性流动。相容剂组成对SBS改性沥青老化前后软化点的影响见图1。由图1可见,随着相容剂中饱和分含量的减少、

芳香分含量的升高, SBS 改性沥青的软化点逐渐升高. 这是因为芳香分和聚合物 SBS 中的硬段即聚乙烯(PS)段结构相似, 能够进入其微区, 对其具有释放作用, 将其本身硬段的特性释放出来^[12], 进而使 SBS 改性沥青表现出软化点升高, 高温性能得到改善. 另外, 较饱和分而言, 芳香分对 SBS 具有更好的相容性, 因此 SBS 在吸收芳香分后能在沥青中更好地分散, 表面积接触增大, 能够供给参加化学反应的空间位置增多, 在稳定剂的作用下 SBS 与沥青形成的空间网状结构更加紧密, 从而更加有利于软化点的升高.

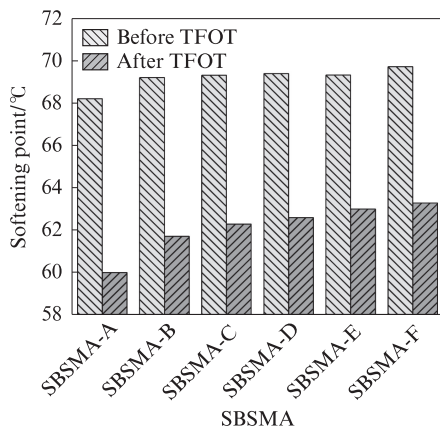


图1 相容剂组成对 SBS 改性沥青老化前后软化点的影响
Fig. 1 Effect of compatibilizer compositions on softening point of SBSMA before and after TFOT

SBS 改性沥青老化后, 其软化点均呈现出了不同程度的降低, 且相容剂中饱和分含量越少、芳香分含量越多所制备的改性沥青老化前后软化点的变化幅度越小. 如 SBSMA-A 老化前后其软化点降低了 12.0%, 而 SBSMA-F 仅降低了 8.5%. 这可能是较多的芳香分使 SBS 改性剂得以更好的溶胀, 在 SBS 改性沥青体系中分散更均匀, 所形成的空间网络结构更加致密, 其抗老化性能更优.

2.1.2 针入度

25 °C 针入度是表示沥青软硬程度和稠度的指标, 体现了其抵抗剪切破坏的能力, 能够反映一定条件下沥青的相对黏度. 针入度越大, 沥青标号越高, 表明沥青越软, 软化点越低, 高温性能随着针入度的增加而降低, 低温性能变好. 相容剂组成对 SBS 改性沥青老化前后针入度的影响见图 2. 由图 2 可见, 随着相容剂中饱和分含量的减少、芳香分含量的升高, 改性沥青的针入度逐渐减小. 针入度的降低是体系黏稠增大的表现, 进而进一步说明芳香分对 SBS 中的 PS 硬段有释放作用, 使其黏度提高, 改善了其高温性能. SBS 改性沥青老化后, 针入度也出现了不同程度

的降低, 且随着相容剂中饱和分含量的减小、芳香分含量的增多, 其 SBS 改性沥青老化前后的针入度差值降低幅度逐渐减小. 如 SBSMA-A 老化前后其针入度降低了 30.5%, 而 SBSMA-F 的针入度降低幅度减少至 25.7%. 究其原因: 一方面, 是饱和分相比于芳香分更易于挥发; 另一方面, 芳香分含量较高时 SBS 改性沥青体系会形成较为致密的空间网络结构, 具有更好的抗老化性能^[13].

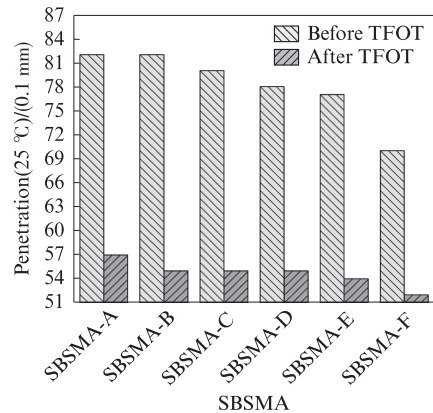


图2 相容剂组成对 SBS 改性沥青老化前后针入度的影响
Fig. 2 Effect of compatibilizer compositions on penetration of SBSMA before and after TFOT

2.1.3 延度

延度是表征沥青塑性的重要指标, 延度越大, 说明沥青的塑性变形能力越好. 5 °C 延度更能表征沥青的低温性能, 5 °C 延度越大, 说明该沥青的低温抗变形能力越强, 反之越弱, 沥青越易脆裂. 相容剂组成对 SBS 改性沥青老化前后延度的影响见图 3. 由图 3 可见: 随着饱和分含量的降低、芳香分含量的升高, 改性沥青(除 SBSMA-B 外)的 5 °C 延度降低, 这是因为饱和分与 SBS 中的软段即聚丁二烯(PB)段结构相似, 饱和分能够进入 PB 段微区, 使其软段柔韧弹

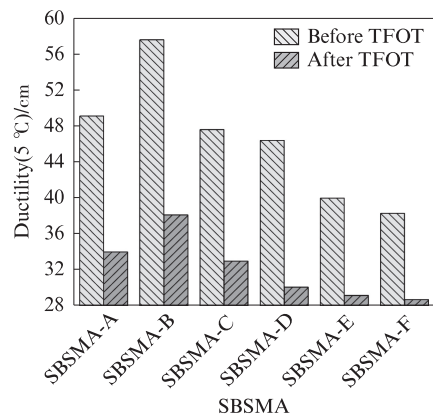


图3 相容剂组成对 SBS 改性沥青老化前后 5 °C 延度的影响
Fig. 3 Effect of compatibilizer compositions on 5 °C ductility of SBSMA before and after TFOT

性好的性能释放出来^[12],最终体现在改性沥青的低温性能上;SBS改性沥青老化后,其延度随着相容剂组成的不同也出现了不同程度的降低,且随着相容剂中饱和分含量的减小、芳香分含量的增多,SBS改性沥青老化前后的5℃延度差值降低幅度逐渐减小.如SBSMA-B老化前后其5℃延度降低了30.8%,而SBSMA-F的5℃延度降低幅度减少至24.5%,即其抗老化性能逐渐变好.由此可见,相容剂中饱和分含量越高,其SBS改性沥青的抗老化性能越差,其延度的衰减幅度越大.

2.2 流变特性

不同组成的相容剂对聚合物SBS改性剂软硬段部分的释放作用是不同的,进而引发了其所制备的SBS改性沥青老化前后性能的变化,从流变特性的角度分析尤为明显.用DSR对SBS改性沥青老化前后的样品进行了温度扫描和多应力重复蠕变试验,以评价其高温性能的变化情况,结果见图4及表4.

由图4及表4可见,相容剂组成对其所制备的

SBS改性沥青的流变特性各参数有较大影响:随着相容剂组成中芳香分含量的增加,其所制备的SBS改性沥青的复数模量 G^* 逐渐升高,即改性沥青的高温性能越好,这是因为芳香分能够释放SBS中的PS硬段,可以改善改性沥青的高温性能即黏性部分损耗模量 G'' ;随着芳香分含量的增加,可以使SBS中的PS更多地释放出来,进而使 G'' 继续增加;随着扫描温度的升高,SBS改性沥青的复数模量 G^* 逐渐降低,相位角 δ 先降低后升高,且均大于 45° .这说明相位角对温度敏感,改性沥青的黏弹比随温度而变化,当温度相对较低时(小于 50°C),其更富有弹性,随着温度的升高弹性逐渐消失,黏性将占主导地位.同时,无论是在高温还是在低温下,即转折点前后,相位角均随着芳香分含量的增大呈现出先增大后减小的趋势,说明当相容剂组成(芳香分、饱和分的相对含量)在某一值时,其对SBS软硬段的释放作用刚好使其改性沥青黏弹比处于最大.

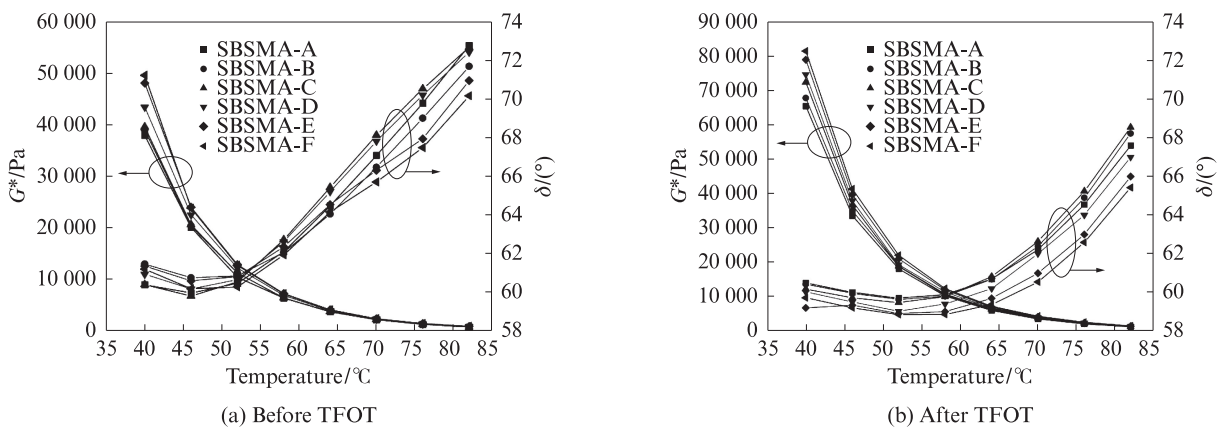


图4 相容剂组成对SBS改性沥青老化前后 G^* 和相位角 δ 的影响
Fig. 4 Effect of compatibilizer compositions on G^* and δ of SBSMA before and after TFOT

表4 相容剂组成对SBS改性沥青老化前后 R 和 J_{nr} 的影响

Table 4 Effect of compatibilizer compositions on R and J_{nr} of SBSMA before and after TFOT

SBSMA	$R/\%$								J_{nr}/kPa							
	Before TFOT				After TFOT				Before TFOT				After TFOT			
	58℃	64℃	70℃	76℃	58℃	64℃	70℃	76℃	58℃	64℃	70℃	76℃	58℃	64℃	70℃	76℃
SBSMA-A	69.7	65.7	60.8	54.7	69.1	62.1	51.6	43.0	0.263	0.577	1.161	2.218	0.167	0.368	0.861	1.923
SBSMA-B	73.5	68.1	62.0	55.1	70.3	64.0	53.9	45.0	0.212	0.512	1.075	2.114	0.154	0.338	0.788	1.723
SBSMA-C	74.1	71.7	67.6	58.2	72.6	67.0	58.1	47.6	0.206	0.471	0.834	1.732	0.140	0.299	0.681	1.537
SBSMA-D	74.9	72.1	68.6	60.1	74.0	68.0	59.5	48.9	0.193	0.453	0.821	1.696	0.130	0.260	0.630	1.420
SBSMA-E	75.8	72.7	71.2	62.8	75.0	70.0	61.8	50.9	0.189	0.414	0.753	1.588	0.150	0.230	0.550	1.280
SBSMA-F	78.0	76.1	74.9	69.9	76.2	71.6	63.5	52.9	0.153	0.305	0.554	1.112	0.101	0.210	0.483	1.112

由表4还可见:相容剂中饱和分含量越高,SBS改性沥青的蠕变回复率 R 和不可回复柔量 J_{nr} 随温度的变化幅度越大;反之,芳香分含量越高, R 与 J_{nr} 变化

越缓慢;随着温度的升高,相容剂的组成对改性沥青的蠕变回复率和不可回复柔量的影响越大,且相容剂中饱和分含量越大、芳香分含量越少该差距越

明显.

由此可知,相容剂中的饱和分含量越高,对SBS改性沥青的性能影响越大,这也是饱和分释放SBS中的PB软段的结果,软段释放的多少会直接影响体系发生化学交联反应的程度,进而会影响其宏观性能.饱和分越多,释放出的PB段就会越多,为此会有更多的PB参与交联反应,进而对SBS改性沥青的性能产生的影响程度就大.

由图4还可见:SBS改性沥青老化后复数模量增加,相位角减小,这是由于SBS改性沥青中改性剂部分受热氧化,使其解离成较小的颗粒,同时聚合物内部结构发生了改变,进而使改性沥青老化后展现出了更多的流动性^[14];相容剂中饱和分含量越多、芳香分含量越少,其流变参数变化越大.老化后蠕变回复率减小,不可回复柔量减小,说明老化后改性沥青的弹性恢复能力变差,抗变形能力提升.同时,随着相

容剂中饱和分含量的增多,SBS改性沥青老化前后 R 和 J_{rr} 变化幅度越大.

2.3 微观结构

SBS改性沥青是一种共混体,SBS溶胀在沥青中,SBS的性能得以传递到沥青上去,进而使其性能得到改善.SBS改性沥青性能的优劣很大程度上取决于二者之间的相容性,而SBS改性沥青中SBS的分散状态又是相容性好坏的直观表现,因此SBS在沥青中的分散状态在一定程度上能够反映改性沥青性能的优劣.

相容剂组成对SBS改性沥青老化前微观结构的影响见图5.由图5可见:不同组成相容剂所制备的SBS改性沥青中,SBS改性剂在沥青体系中分散较为均匀,且其粒径均小于 $5\mu\text{m}$,形成了SBS相和沥青相双连续相结构,说明相容剂的组成对SBS改性沥青老化前的微观结构影响不大.

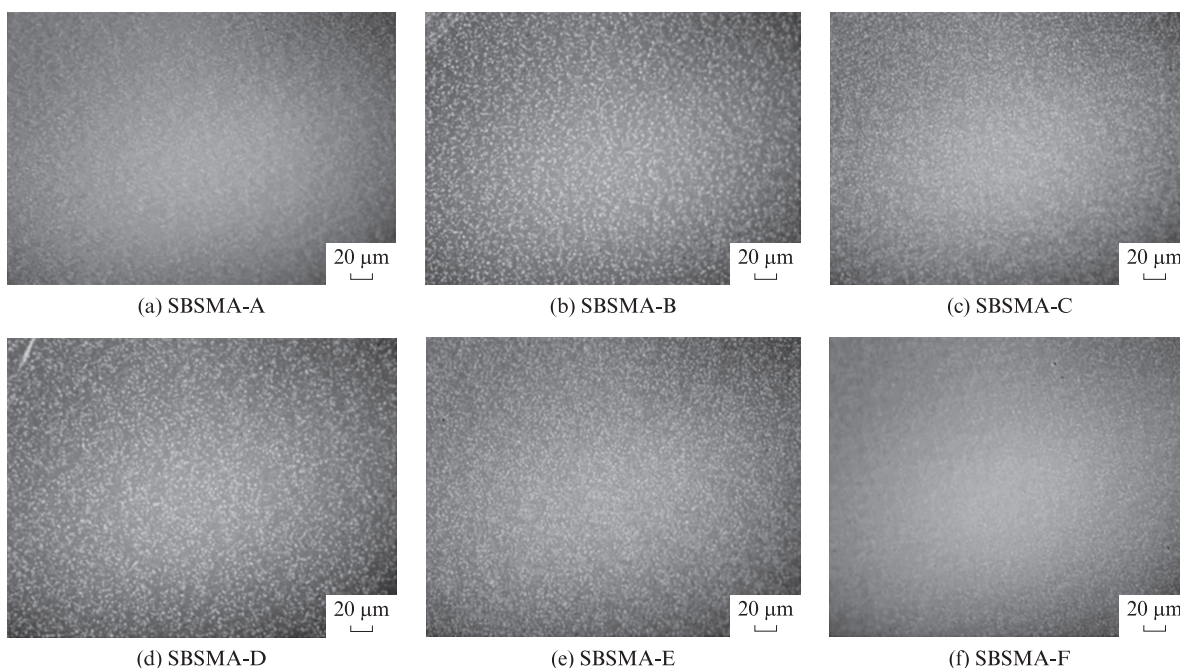


图5 相容剂组成对SBS改性沥青老化前微观结构的影响

Fig. 5 Effect of compatibilizer compositions on microstructure of SBSMA before TFOT

相容剂组成对SBS改性沥青老化后微观结构的影响见图6.由图6可见,老化后SBS改性沥青微观结构发生了较大的变化,SBS相发生了明显的聚集现象,且颗粒粒径明显增大,微观结构由老化前的SBS相和沥青相双连续相结构转变为SBS相趋于分散相、沥青趋于连续相,且其微观状态明显失去了较为致密的网状结构.这一方面是由于SBS本身发生了聚集;另一方面是由于高温下交联化学键的断裂使体系性质劣化^[15].随着相容剂组成的变化,SBS改性沥青老化后微观结构的变化幅度存在不同.随

着相容剂中饱和分含量的增多、芳香分含量的减少,老化后SBS改性沥青中SBS相的聚集状态越严重、颗粒粒径越大,体系的稳定性越差.其原因可能为相容剂中的芳香分越多,可以使SBS聚合物溶胀更充分,分散更均匀,所形成的空间网络结构更加致密,体系更稳定,进而其抗老化性能越好.而更多的饱和分存在时,一方面SBS聚合物无法得以充分溶胀;另一方面饱和分在高温下容易挥发,过多饱和分的损失也会造成体系轻组分过少,导致体系的相容性变差.

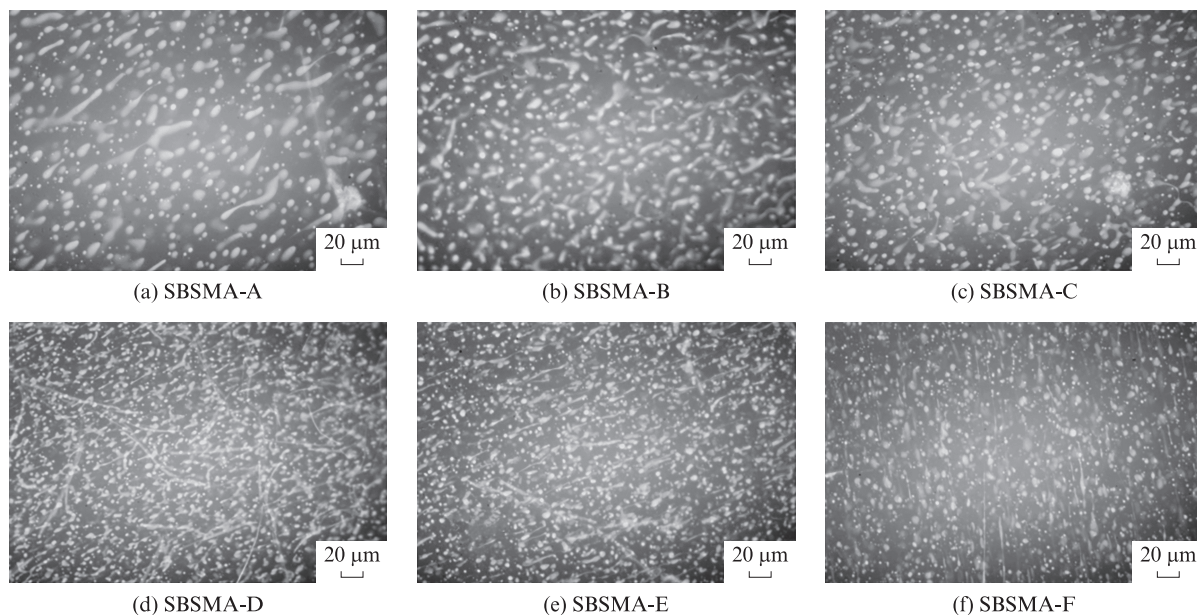


图6 相容剂组成对SBS改性沥青老化后微观结构的影响

Fig. 6 Effect of compatibilizer compositions on microstructure of SBSMA after TFOT

3 结论

(1)相容剂中芳香分含量越多,SBS改性沥青的软化点越高;饱和分含量越多,SBS改性沥青的5℃延度越大.说明相容剂中芳香分对SBS中PS硬段有释放作用,而饱和分对PB软段有释放作用,进而分别贡献于沥青的高低温性能.相容剂中饱和分含量越少、芳香分含量越多,所制备的SBS改性沥青老化前后常规性能变化幅度越小,即其抗老化性能越好.

(2)相容剂中芳香分含量越高,SBS改性沥青的复数模量 G^* 和蠕变回复率 R 越大,不可回复柔量 J_{nr} 越小.老化后,其 G^* 、 R 、 J_{nr} 均减小,且随着相容剂中饱和分含量的增多其流变特性的变化幅度增大,即饱和分含量增多,SBS改性沥青抗老化性能变差.

(3)相容剂的组成对SBS改性沥青的微观结构影响不大,均可形成较为致密的空间网络结构;而老化后SBS改性沥青的微观结构均发生了明显的SBS聚集现象,由原来的SBS相和沥青相双连续相结构变为SBS相为分散相、沥青相为连续相的结构.随着相容剂中饱和分含量的增多、芳香分含量的减少,老化后SBS改性沥青中SBS相的聚集状态变得更严重、颗粒粒径增大,体系的稳定性变差.

参考文献:

[1] 崔亚楠,郭立典,陈东升. SBS改性沥青的复合老化机理[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(5):1183-1191.
CUI Yanan, GUO Lidian, CHEN Dongsheng. Composite aging

mechanism of SBS modified asphalt [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(5):1183-1191. (in Chinese)

- [2] SENGOZ B, ISIKYAKAR G. Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(9):1897-1905.
- [3] ZHU C Z, ZHANG H L, ZHANG D M, et al. Influence of base asphalt and SBS modifier on the weathering aging behaviors of SBS modified asphalt [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(3):04017306.
- [4] 李斌. 高掺量SBS改性沥青抗老化性能研究[D]. 西安:长安大学, 2020.
LI Bin. Study on anti-aging properties of modified asphalt with high content SBS[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese)
- [5] 丛玉凤. 无机材料对SBS改性沥青稳定性的作用[D]. 沈阳:东北大学, 2005.
CONG Yufeng. Effects of inorganic materials on the stability of SBS modified asphalt[D]. Shenyang: Northeastern University, 2005. (in Chinese)
- [6] 周振君, 王俊岩, 丛培良. SBS改性沥青热储存及运输过程中的降解研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2):430-437.
ZHOU Zhenjun, WANG Junyan, CONG Peiliang. Study on degradation of SBS modified asphalt during thermal storage and transportation[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2): 430-437. (in Chinese)
- [7] 张争奇, 李平, 王秉纲. SBS改性沥青性能及老化的影响[J]. 公路, 2005(9):150-155.
ZHANG Zhengqi, LI Ping, WANG Binggang. Performance of SBS modified asphalt and influence of aging[J]. Highway, 2005 (9):150-155. (in Chinese)
- [8] 王明, 刘黎萍, 吴后选. SBS改性沥青显微相态与宏观性能相关性研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1):119-123, 142.
WANG Ming, LIU Liping, WU Houxuan. Study on the

- correlation between microphase state and macroscopic properties of SBS modified asphalt[J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19(1): 119-123, 142. (in Chinese)
- [9] 冉龙飞. 热、光、水耦合条件下SBS改性沥青老化机理研究及高性能再生剂开发[D]. 重庆:重庆交通大学, 2016.
RAN Longfei. Research on aging mechanism and high performance regenerant of SBS modified asphalt under coupling condition of light, heat, water [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [10] 吉永海, 郭淑华, 李锐. SBS改性沥青的相容性和稳定性机理[J]. *石油学报(石油加工)*, 2002(3):23-29.
JI Yonghai, GUO Shuhua, LI Rui. Mechanism of compatibilizer and stability of SBS modified asphalt[J]. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2002(3):23-29. (in Chinese)
- [11] DONG F Q, YANG P X, YU X, et al. Morphology, chemical reaction mechanism and cross-linking degree of asphalt binder modified by SBS block co-polymer[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 378:131204.
- [12] 原健安, 周吉萍, 李玉珍. SBS与沥青的相互作用性分析[J]. *中国公路学报*, 2005(4):21-26.
YUAN Jianan, ZHOU Jiping, LI Yuzhen. Analysis of interaction between SBS and asphalt[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2005(4):21-26. (in Chinese)
- [13] REN J L, ZHANG X Q, PENG C, et al. Short-term aging characteristics and mechanisms of SBS-modified bio-asphalt binder considering time-dependent effect [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 352:129048.
- [14] 陈峰. 基质沥青和SBS改性沥青老化行为与机理研究[D]. 西安:长安大学, 2012.
CHEN Feng. Aging behavior and mechanism of base asphalt and SBS modified asphalt[D]. Xi'an:Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [15] 祁文洋, 李立寒, 张明杰, 等. SBS改性沥青的阶段性老化特征与机理[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(1):95-99.
QI Wenyang, LI Lihan, ZHANG Mingjie, et al. Characteristics and mechanism of SBS modified asphalt's phased aging [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2016, 44(1): 95-99. (in Chinese)