2021 年 第21 卷 第31 期
2021, 21(31): 13505-05

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

ISSN 1671—1815
CN 11—4688/T

引用格式:陈 鹏, 邹 玲, 庄 明, 等. 苯乙烯丁二烯苯乙烯嵌段共聚物改性沥青贮存稳定性评价方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(31): 13505-13509.

Chen Peng, Zou Ling, Zhuang Ming, et al. Storage stability evaluation methodof styrene-gutadiene-styrene block copolymer modified asphalt [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(31): 13505-13509.

苯乙烯丁二烯苯乙烯嵌段共聚物改性沥青贮存稳定性评价方法

陈 鹏[1], 邹 玲[2,3], 庄 明[1], 侯洪超[1], 仲 丁[1], 张文刚[4,5*]

(1. 北京中交桥宇科技有限公司, 北京 100000; 2. 东南大学交通学院, 南京 211189;
3. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 西安 710075; 4. 山东理工大学建筑工程学院, 淄博 255000;
5. 道路结构与材料交通运输行业重点实验室(交通运输部公路科学研究所), 北京 100088)

摘 要 为了研究基于动态剪切流变(dynamic shear rheological,DSR)试验的苯乙烯丁二烯苯乙烯嵌段共聚物(styrene-butadiene-styrene block copolymer,SBS)改性沥青贮存稳定性的评价方法,通过选择 SBSI-D 改性沥青为研究对象,测试其在 163 ℃下不同贮存时间的离析软化点差,基于相对应的复数剪切模量、相位角以及车辙因子,提出了以复数剪切模量离析参数、相位角离析参数、车辙因子离析参数以及三个参数与温度所形成的线性斜率为参数的 SBS 改性沥青贮存稳定性评价指标及计算模型。研究结果表明:SBS 改性沥青的离析软化点差随着高温贮存时间的延长而逐渐增大,两者基本呈线性关系;离析后 SBSI-D 改性沥青上部 1/3 的弹性成分、抗变形能力及高温性能明显大于下部 1/3;基于 DSR 试验的 SBS 改性沥青贮存稳定性评价指标的评价结果与基于离析软化点差所获得的评价结果具有高度的一致性。

关键词 SBS 改性沥青; 贮存稳定性; 动态剪切流变(DSR); 离析软化点差; 评价指标

中图法分类号 U414; **文献标志码** A

Storage Stability Evaluation Methodof Styrene-gutadiene-styrene Block Copolymer Modified Asphalt

CHEN Peng[1], ZOU Ling[2,3], ZHUANG Ming[1], HOU Hong-chao[1], ZHONG Ding[1], ZHANG Wen-gang[4,5*]

(1. Beijing CCCC Qiaoyu Science and Technology Co., Ltd., Beijing 271000, China; 2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 4. School of Civil and Architectural Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; 5. Key Laboratory of Transport Industry of Road Structure and Material (Research Institute of Highway, Ministry of Transport), Beijing 100088, China)

[**Abstract**] In order to study the evaluation method of storage stability of styrene-butadiene-styrene block copolymer (SBS) modified asphalt based on the dynamic shear rheological (DSR) test, SBSI-D modified asphalt was selected as the raw material. The segregation softening points differences of different storage time at 163 ℃ were tested. Based on the corresponding complex shear modulus, phase angle, and rutting factor, a calculation model of SBS modified asphalt storage stability evaluation index was proposed, which took the complex shear modulus segregation parameter, phase angle segregation parameter, rutting factor segregation parameter and the linear slope formed by the three parameters and temperature as parameters. The results show that the segregation softening points differences of SBSI-D modified asphalt gradually increase with the extension of high-temperature storage time, and the relationship between them is basically linear. After segregation, the elastic composition, deformation resistance and high-temperature performance of the upper 1/3 of SBSI-D modified asphalt are significantly greater than that of the lower 1/3. The calculation model of SBS modified asphalt storage stability evaluation index based on the DSR test, which takes complex shear modulus segregation parameter, phase angle segregation parameter, rutting factor segregation parameter, and the linear slope formed by the three parameters and temperature as parameters, has high consistency with the evaluation result based on segregation softening point difference.

[**Keywords**] SBS modified asphalt; storage stability; dynamic shear rheological (DSR); segregation softening point difference; evaluating indicator

---

收稿日期: 2021-02-24; **修订日期**: 2021-08-16

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1600100);道路结构与材料交通运输行业重点实验室(交通运输部公路科学研究所)开放基金课题(2019-科技-271)

第一作者: 陈 鹏(1983—),男,汉族,山东新泰人,高级工程师。研究方向:道路工程。E-mail:zjqychenpeng1983@yeah.net。

* **通信作者**: 张文刚(1986—),男,汉族,山东淄博人,博士,副教授,硕士研究生导师。研究方向:道路建筑材料。E-mail:ziwuzizwg@sdut.edu.cn。

苯乙烯丁二烯苯乙烯嵌段共聚物(styrene-butadiene-styrene block copolymer,SBS)改性沥青的贮存稳定性是影响其运输及存储的重要性能,中外学者对贮存稳定性也开展了大量的研究工作。例如,孙建民[1]发现 SBS 改性沥青在不同的贮存温度下拥有相似的贮存稳定性变化规律;王立志等[2]发现基质沥青的纳观表面形态越粗糙,SBS 改性沥青的 48 h 离析软化点差则越大;一些外加剂也可以影响 SBS 改性沥青的贮存稳定性,相关研究表明 ZnO 和 TMTD(二硫化四甲基秋兰姆)均能够起到提升 SBS 改性沥青贮存稳定性的作用[3-4];纳米二氧化硅、纳米黏土可以与 SBS 形成空间网络结构,从而起到阻止 SBS 与沥青分离的作用[5-6]。但在 SBS 改性沥青贮存稳定性评价上,中外基本上都采取 48 h 离析软化点差作为评价指标。此外也有学者认为离析指数、中温离析率和降解率也可以作为 SBS 改性沥青贮存稳定性的可靠指标[7]。但遗憾的是,采用上述指标对 SBS 改性沥青贮存稳定性进行评价的可靠性鲜有研究。近年来,动态剪切流变仪(dynamic shear rheological,DSR)活跃在沥青的研究领域,发挥着巨大的作用,复数剪切模量(G^*)可以用于表征沥青抵抗剪切变形的能力,相位角(δ)则代表着沥青中黏性成分与弹性成分的比值关系,车辙因子($G^*/\sin\delta$)可以用于评价沥青的高温性能[8-10]。有学者报道了 DSR 试验过程中的相关参数与 SBS 改性沥青的贮存稳定性可能存在某种联系,但截至目前,尚未发现关于这种猜测的详细研究与报道[10-13]。基于 DSR 试验结果是否可以评价 SBS 改性沥青的贮存稳定性便成为了摆在研究人员面前的一道难题。

基于上述背景,现选择 SBSI-D 改性沥青为研究对象,测试其在 163 ℃下不同贮存时间的离析软化点差,基于 G^*、δ 及 $G^*/\sin\delta$,提出基于 DSR 试验的 SBS 改性沥青贮存稳定性评价指标及其计算模型,为基于 DSR 试验评价沥青贮存稳定性提供新的思路。

1 原材料与试验设计

1.1 原材料

选择山东高速物资储运有限公司生产的 SBS I-D 改性沥青为原材料,该沥青中 SBS 含量为 4%,且线形 SBS 和星形 SBS 质量比为 1∶1,其技术指标如表 1 所示,除 48 h 离析软化点差外,其余各项指标均满足相关规范的要求。

图 1 所示为 SBSI-D 改性沥青在进行离析试验前的荧光显微图,可以看出实验所用 SBSI-D 改性沥青中,SBS 发育良好,基本形成了网状结构。

表 1 SBS I-D 改性沥青技术性能

Table 1 Technical indexes of SBS I-D modified asphalt

参数	试验 1	试验 2	试验 3
质量变化/%	0.8	0.7	0.7
针入度百分比/%	76.1	79.2	80.3
5 ℃残留延度/cm	19.9	20.1	20.4
5 ℃延度/cm	29.1	27.8	30.4
135 ℃布氏黏度/(Pa·s)	1.998	1.961	2.017
软化点/℃	79.3	78.2	81.3
25 ℃针入度/0.1 mm	54.6	55.1	54.9
25 ℃弹性恢复/%	86.7	88.2	88.7
溶解度/%	99.4	99.3	99.4

注:以上参数值通过薄膜加热试验获得。

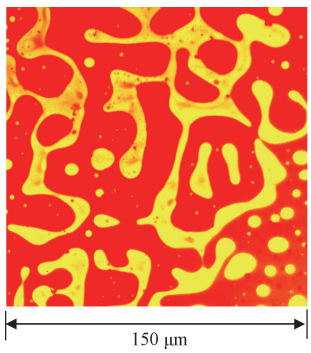

图 1 SBSI-D 改性沥青荧光显微图

Fig. 1 Fluorescence micrograph of SBSI-D modified asphalt

1.2 试验设计

将 SBSI-D 改性沥青倒入直径 25 mm、长度 140 mm 的铝管(一端开口)中,在 163 ℃下进行贮存,将贮存 0~48 h(间隔 2 h)的铝管放入 -18 ℃的环境箱中进行冷却,冷却后取铝管中上部 1/3 和下部 1/3 的沥青备用,分别测取 0~48 h(间隔 2 h)的 SBSI-D 改性沥青的离析软化点差。采用 AR 1500ex 型动态剪切流变仪(DSR)对贮存不同时间的 SBSI-D 改性沥青(上部 1/3 和下部 1/3)分别进行温度扫描试验,获取 G^*、δ 以及 $G^*/\sin\delta$。依据试验结果分析沥青贮存稳定性与 G^*、δ 和 $G^*/\sin\delta$ 等参数间的关系,建立基于 DSR 的改性沥青贮存稳定性评价指标及计算模型。

2 试验结果

2.1 离析软化点与贮存时间的关系

对不同贮存时间下的 SBSI-D 改性沥青进行离析软化点差试验,试验结果如图 2 所示。

图 2 显示,随着高温贮存时间的延长,SBSI-D 改性沥青的离析软化点差也随即增大,出现该现象的原因主要是由于 SBS 与沥青之间存在密度差,导致 SBS 上浮,形成改性沥青中上部 SBS 含量高,下

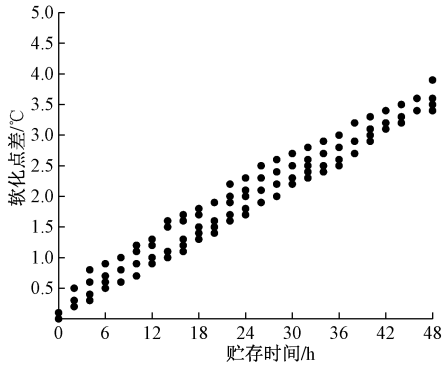

图 2　不同贮存时间下 SBSI-D 改性沥青离析软化点试验结果

Fig. 2　Test results of segregation softening pointdifference of SBSI-D modified asphalt under different storage time

部中的 SBS 含量降低,这种离析现象随着高温贮存时间的延长而越发明显。

2.2　基于 DSR 试验结果的贮存稳定性

选择 163 ℃贮存 48 h 的 SBSI-D 改性沥青为研究对象,对其上部 1/3 及下部 1/3 的改性沥青分别进行温度扫描,扫描温度范围为 46 ~ 88 ℃,间隔 6 ℃。为了研究方便,同时将 163 ℃下贮存 48 h 的 SBSI-D 改性沥青再次搅拌均匀后,利用 DSR 进行温度扫描。图 3 所示为 DSR 温度扫描结果。

图 3 显示,随着扫描温度的逐渐上升,SBSI-D 改性沥青的 G^*和 $G^*/\sin\delta$ 相应降低,δ 则逐渐升高。离析后的 SBSI-D 改性沥青其上部 1/3 和下部 1/3 的 G^*、δ 和 $G^*/\sin\delta$ 有着明显的差值,而离析后再次搅拌均匀的 SBSI-D 改性沥青 G^*、δ 和 $G^*/\sin\delta$ 的数值则处于上部 1/3 和下部 1/3 之间。由于 G^*为复数剪切模量,其数值越大,表征沥青的抗剪切变形能力也越高,可见离析后 SBSI-D 改性沥青上部 1/3 的抗变形能力要强于下部 1/3;δ 通常用于表征沥青中黏弹性成分的比值,一般认为 δ 越大,沥青中黏性成分的含量就越大,δ 越小,沥青中弹性成分的含量就越大,可见离析后 SBSI-D 改性沥青上部 1/3 的弹性成分远多于下部 1/3;$G^*/\sin\delta$ 表征车辙因子,离析后 SBSI-D 改性沥青上部 1/3 的车辙因子远大于下部 1/3。上述现象出现的原因与上部 1/3 含有大量的 SBS 关系密切。

3　基于 DSR 试验的 SBS 改性沥青贮存稳定性评价指标

3.1　基于 DSR 试验的 SBS 改性沥青贮存稳定性评价指标的提出与有效性检验

上述分析表明,DSR 的试验结果与 SBS 的离析关系密切,而 SBS 的离析则直接决定 SBS 改性沥青的贮存稳定性。基于试验结果提出离析参数的概念,即以 163 ℃下贮存 t h 的 SBS 改性沥青再次搅拌均匀后 DSR 温度扫描试验结果(G^*、δ 和 $G^*/\sin\delta$)为基数,对同种 SBS 改性沥青 163 ℃下贮存 t h 后,上部 1/3 与下部 1/3 的 DSR 温度扫描结果差值的绝对值与基数比值,计算公式为

$$G^{*\prime} = |(G^*_{上} - G^*_{下})/G^*_{原样}| \tag{1}$$

式(1)中:$G^{*\prime}$ 为复数剪切模量离析参数,%;$G^*_{上}$为离析后 SBS 改性沥青上部 1/3 的复数剪切模量,Pa;$G^*_{下}$为离析后 SBS 改性沥青下部 1/3 的复数剪切模量,Pa;$G^*_{原样}$ 为离析后再次搅拌均匀的 SBS 改性沥青的复数剪切模量,Pa。

$$\delta' = |(\delta_{上} - \delta_{下})/\delta_{原样}| \tag{2}$$

式(2)中:δ' 为相位角离析参数,%;$\delta_{上}$为离析后 SBS 改性沥青上部 1/3 的相位角,(°);$\delta_{下}$为离析后 SBS 改性沥青下部 1/3 的相位角,(°);$\delta_{原样}$ 为离析后再次搅拌均匀的 SBS 改性沥青的相位角,(°)。

$$(G^*/\sin\delta)' = (G^*/\sin\delta)_{上} - (G^*/\sin\delta)_{下}$$
$$(G^*/\sin\delta)_{原样} \tag{3}$$

式(3)中:$(G^*/\sin\delta)'$ 为车辙因子离析参数,%;$(G^*/\sin\delta)_{上}$为离析后 SBS 改性沥青上部 1/3 的车辙因子,Pa;$(G^*/\sin\delta)_{下}$为离析后 SBS 改性沥青下部 1/3 的车辙因子,Pa;$(G^*/\sin\delta)_{原样}$ 为离析后再次

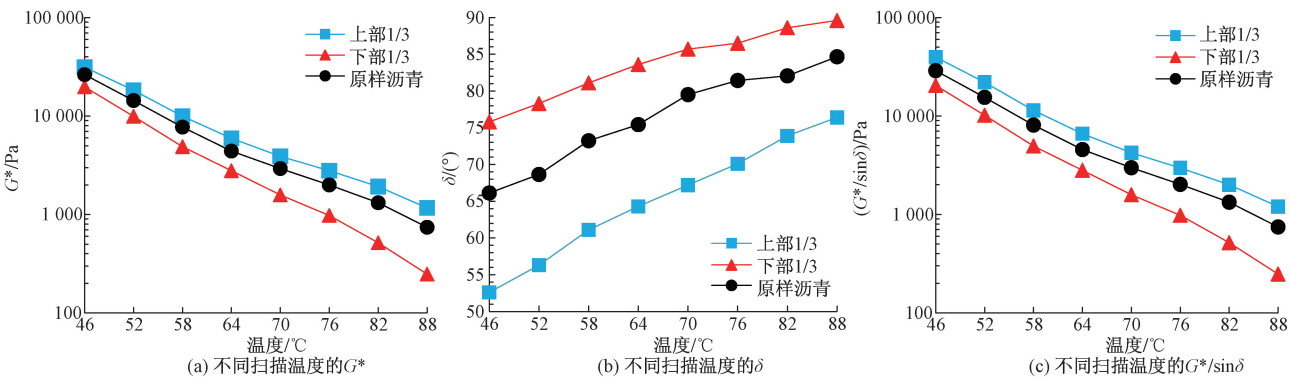

图 3　DSR 温度扫描试验结果

Fig. 3　DSR temperature scanning test results

搅拌均匀的 SBS 改性沥青的车辙因子,Pa。

如图 4 所示为 DSR 试验中离析参数的变化图。图 4 中蕴含着两个信息,一是各离析参数在不同温度下的数值,二是各离析参数随着温度变化的斜率。需要注意的是,如果某种 SBS 改性沥青不存在离析问题,那么该 SBS 改性沥青的各离析参数的数值便为 0,离析参数随扫描温度的变化斜率也相应为 0。也就是说离析参数的大小和离析参数随扫描温度的变化斜率越接近 0,则该沥青的贮存稳定性也就越好。

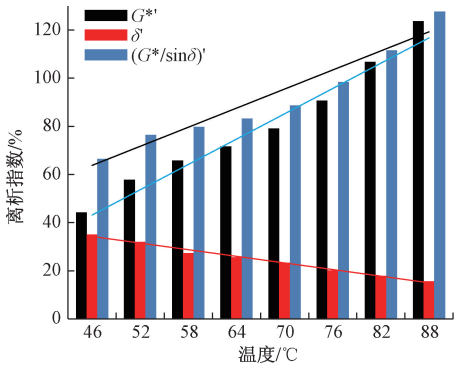

图 4 不同扫描温度下的离析参数

Fig. 4 Segregation parameters at different scanning temperatures

基于上述分析,提出基于 DSR 试验的 SBS 改性沥青贮存稳定性评价指标及其计算模型,模型假设前提条件为 SBS 改性沥青贮存稳定性分值最大为 100,最小为 0。该计算模型为

$$S_S(G^*) = 100 - \{a_1[\mathrm{AVG}(G^{*\prime})]^{b_1} + c_1[\mathrm{SLOP}(G^{*\prime})]^{d_1}\} \quad (4)$$

式(4)中:$S_S(G^*)$ 为基于复数剪切模量离析参数贮存稳定性得分值;$\mathrm{AVG}(G^{*\prime})$ 为复数剪切模量离析参数平均值,Pa;$\mathrm{SLOP}(G^{*\prime})$ 为复数剪切模量离析参数与温度所形成的线性关系斜率;a_1、b_1、c_1、d_1 为系数。

$$S_S(\delta) = 100 + a_2[\mathrm{AVG}(\delta')]^{b_2} + c_2[\mathrm{SLOP}(\delta')]^{d_2} \quad (5)$$

式(5)中:$S_S(\delta)$ 为基于相位角离析参数的 SBS 改性沥青贮存稳定性得分值;$\mathrm{AVG}(\delta')$ 为相位角离析参数平均值,%;$\mathrm{SLOP}(\delta')$ 为相位角离析参数与温度所形成的线性关系的斜率;a_2、b_2、c_2、d_2 为系数。

$$S_S(G^*/\sin\delta) = 100 - \{a_3[\mathrm{AVG}(G^*/\sin\delta)']^{b_3} + c_3[\mathrm{SLOP}(G^*/\sin\delta)']^{d_3}\} \quad (6)$$

式(6)中:$S_S(G^*/\sin\delta)$ 为基于车辙因子的 SBS 改性沥青贮存稳定性得分值;$\mathrm{AVG}(G^*/\sin\delta)'$ 为车辙因子离析参数平均值,%;$\mathrm{SLOP}(G^*/\sin\delta)'$ 为车辙因子离析参数与温度所形成的线性关系的斜率;a_3、b_3、c_3、d_3 为系数。

选取 $S_S(G^*)$,基于复数剪切模量离析参数贮存稳定性得分值与试验结果进行比较,以评判贮存稳定性评价指标的可靠性。为了贮存稳定性评价指标与离析软化点指标具有可比性,依据模型假设前提条件对离析软化点数据作如下修订:SBS 改性沥青最大离析软化点差为 100 ℃,记 0 分,最小离析软化点差为 0 ℃,记 100 分。则不同贮存时间下基于 DSR 的贮存稳定性得分值与基于离析软化点差的贮存稳定性得分值试验结果如图 5 所示。

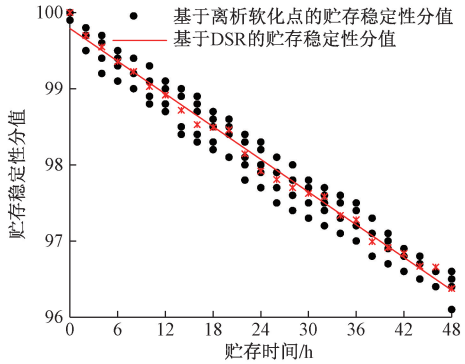

图 5 图 5 基于 DSR 和离析软化点差的贮存稳定性得分值

Fig. 5 Storage stability score based on DSR and segregation softening point difference

从图 5 可以看出,基于复数剪切模量离析参数贮存稳定性得分值与基于离析软化点差的贮存稳定性得分值具有高度的一致性。相比较于离析软化点试验而言,基本复数剪切模量离析参数贮存稳定性得分值的评价方法可靠性更高,更重要的是,在试验过程中无需高温贮存 48 h,可以选择更短的贮存时间便可以计算出贮存 48 h 所对应的稳定性得分值。

3.2 基于 DSR 试验的 SBS 改性沥青贮存稳定性评价指标与现有指标对比

中外普遍采取离析软化点作为 SBS 改性沥青贮存稳定性的评价指标,该指标的获取依托于软化点试验。中国对于软化点试验的相关方法和规定与美国及日本是完全相同的,在《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)[14] 中规定,软化点试验允许的重复性误差为:当软化点小于 80 ℃时误差为 1 ℃,当软化点大于 80 ℃时误差为 2 ℃,此外,在《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)[15] 中规定,SBS 改性沥青的 48 h 离析软化点差不大于 2.5 ℃。所以离析软化点在试验过程中误差的影响是相对较大的,而本文中基于 DSR 试验的 SBS 改性沥青贮存稳定性评价指标则借助 DSR 试验的高度稳定性及极低的误差较好地弥补了离析软化点的不足。表 2 所示为两种指标的对比。

表 2　SBS 改性沥青贮存稳定性评价指标对比

Table 2　Comparison of storage stability evaluation indexes of SBS modified asphalt

试验编号	测试时间	试验误差
基于 DSR 试验的 SBS 改性沥青贮存稳定性评价指标	小于 24 h	忽略不计
离析软化点	大于 48 h	最大可达 4 ℃或 8 ℃

4　结论

(1)SBS 改性沥青的离析软化点差随着高温贮存时间的延长而逐渐增大,两者基本呈线性关系。

(2)由于 SBS 改性的上浮作用,离析后 SBSI-D 改性沥青上部 1/3 的弹性成分也远多于下部 1/3,上部 1/3 的抗变形能力及高温性能明显强于下部 1/3。

(3)复数剪切模量离析参数 $G^{*\prime}$、相位角离析参数 δ'、车辙因子离析参数 $(G^*/\sin\delta)'$ 以及 3 个参数与温度所形成的线性斜率可以用于评价 SBS 改性沥青离析程度的参数。

(4)本文所提出的基于 DSR 试验的 SBS 改性沥青贮存稳定性评价指标其计算模型可以很好地用于贮存稳定性的评价,其评价结果与基于离析软化点差所获得的评价结果具有高度的一致性。

参　考　文　献

[1] 孙建民. 不同贮存温度下 SBS 改性沥青稳定性研究[J]. 中外公路, 2012, 32(5): 229-232.
Sun Jianming. Study on stability of SBS modified asphalt at different storage temperatures[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2012, 32(5): 229-232.

[2] 王立志, 刘　凯, 王　鹏, 等. 微观特性对 SBS 改性沥青存储稳定性影响研究[J]. 山东建筑大学学报, 2020, 35(6): 7-14, 36.
Wang Lizhi, Liu Kai, Wang Peng, et al. Research on influence of microscopic characteristics on storage stability of SBS modified asphalt[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2020, 35(6): 7-14, 36.

[3] 黄　娟. 纳米 ZnO 对 SBS 改性沥青及混合料性能的影响[J]. 大连交通大学学报, 2019, 40(5): 103-106.
Huang Juan. Research on technical performance of compound modified asphalt by Nano-Zinc Oxide and SBS[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2019, 40(5): 103-106.

[4] 张文刚, 袁中玉, 丁龙亭, 等. TMTD 对 SBS 改性沥青性能影响研究[J]. 施工技术, 2019, 48(5): 75-77, 109.
Zhang Wengang, Yuan Zhongyu, Ding Longting, et al. Research on effect of TMTD on SBS modified asphalt performance[J]. Construction Technology, 2019, 48(5): 75-77, 109.

[5] Lushinga N, Cao L, Dong Z, et al. Improving storage stability and physicochemical performance of styrene-butadiene-styrene asphalt binder modified with nanosilica[J]. Sustainability, 2020, 12: 8969.

[6] Moussa G S, Abdel-Raheem A, Abdel-Wahed T. Effect of nanoclay particles on the performance of high-density polyethylene-modified asphalt concrete mixture[J]. Polymers, 2021, 13: 434.

[7] Wen Y, Liu Q, Chen L, et al. Review and comparison of methods to assess the storage stability of terminal blend rubberized asphalt binders[J]. Construction and Building Materials, 2020, 258: 119586.

[8] 叶向前, 邹晓翎, 董　琴. 苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物-改性胶粉复合改性沥青路用性能流变学分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(2): 758-763.
Ye Xiangqian, Zou Xiaoling, Dong Qin. Rheological study of paving performance of styrene-butadiene-styrene block copolymer-modified rubber powder composite modified asphalt[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(2): 758-763.

[9] 祝斯月, 臧　濛, 廖梦回, 等. 高黏改性沥青胶浆黏弹性力学行为分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(31): 13015-13020.
Zhu Siyue, Zang Meng, Liao Menghui, et al. Analysis of viscoelastic mechanical behavior of high viscosity asphalt mortar[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(31): 13015-13020.

[10] 范世平, 朱洪洲, 钟伟明. 基于 DSR 试验生物重油再生沥青流变性评价[J/OL]. 建筑材料学报: 1-10[2021-08-30]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20210204.1124.016.html.
Fan Shiping, Zhu Hongzhou, Zhong Weiming. Rheological performance evaluation of heavy bio-oil recycled asphalt based on DSR test[J/OL]. Journal of Building Materials: 1-10[2021-08-30]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20210204.1124.016.html.

[11] 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, 7: 246-251.
Xu Guoqi, Zhai Bochao, Hu Liqun, et al. Tests and studies on storage stability of high viscosity modified asphalt[J]. Higway, 2019, 7: 246-251.

[12] 吕　泉, 黄卫东, 孙立军, 等. 沥青粘附性自愈合性能评价与机理分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021(3): 33-41.
Lü Quan, Huang Weidong, Sun Lijun, et al. Evaluation and mechanism analysis of adhesive self-healing property of asphalt[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021(3): 33-41.

[13] Liang M, Xin X, Fan W, et al. Phase behavior and hot storage characteristics of asphalt modified with various polyethylene: experimental and numerical characterizations[J]. Construction and Building Materials, 2019, 203: 608-620.

[14] 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 of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011[S]. Beijing: China Communication Press Co., Ltd., 2011.

[15] 交通部公路科学研究所. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Technical-specifications for construction of highway asphalt pavements: JTG F40—2004[S]. Beijing: China Communication Press Co., Ltd., 2004.