

老化沥青介入下 SBS 改性沥青特性研究

杨 朋¹,王端宜²,韩玉梅¹,刘艳新¹,尹应梅³

(1. 广州航海学院航务工程学院,广东 广州 510725;2. 华南理工大学土木交通学院,广东 广州 510641;
3. 广东工业大学土木与交通工程学院,广东 广州 510006)

摘 要 目的 通过分析不同老化沥青掺量(0%、10%、20%、30%)的再生沥青的温度敏感性、高低温性能、蠕变疲劳性能和微观分析等,系统地研究老化沥青介入下 SBS 改性沥青的特性. 方法 对不同沥青的动力黏度、黏温指数(VTS)进行测定和分析;采用高温动态剪切流变仪、弯曲梁流变仪、直接拉伸仪对样品试验,利用荧光显微镜分析了沥青样品成分. 结果 在高低温下,再生沥青的黏度变化不一致;当老化沥青掺量大于30%时,才能改善再生沥青的温度敏感性;随着老化沥青掺量的增加,再生 SBS 改性沥青具有更好的高温抗车辙性能,临界开裂温度则不断升高;老化沥青少量参加有利于提高再生沥青的疲劳寿命,大量参加会降低沥青的蠕变疲劳性能. 结论 随着老化沥青掺量的增加,再生 SBS 改性沥青具有更好的高温抗车辙性能,但再生沥青的低温开裂性降低,蠕变疲劳性能下降,SBS 分布变得不均匀且粒径大小不一.

关键词 老化沥青;SBS 改性沥青;流变性;蠕变;特性

中图分类号 TU535;U416.217

文献标志码 A

Performance Characteristics of SBS Modified Asphalt with Aging Asphalt

YANG Peng¹, WANG Duanyi², HAN Yumei¹, LIU Yanxin¹, YIN Yingmei³

(1. School of Harbor Engineering, Guangzhou Maritime University, Guangzhou, China, 510725; 2. School of Civil and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou, China, 510641; 3. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, China, 510006)

Abstract: This paper provides a research on the temperature sensitivity, high and low temperature performance, creep fatigue properties and microscopic analysis of recycled asphalt with different aging asphalt content (0%, 10%, 20%, 30%). The dynamic viscosity and viscosity-temperature index (VTS) of different asphalt were measured and analyzed. The samples were tested by high-temperature dynamic shear rheometer, bending beam rheometer and direct tensile tester. Finally, the composition of asphalt samples was analyzed by fluorescence microscope. At high and low temperature, the change of viscosity of recycled asphalt is inconsistent. When the content of aged asphalt

收稿日期:2017-09-24

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51508109);广州航海学院国家级大学生创新创业训练项目(2017JJ08);广东省滨海土木工程耐久性重点实验室开放基金项目(GDDCE17-3)

作者简介:杨朋(1979—),男,博士,主要从事土木工程材料方面研究.

is more than 30%, the temperature sensitivity of recycled asphalt can be improved. With the increase of the content of aged asphalt, the regenerated SBS modified asphalt has better high temperature Anti-rutting performance, the critical cracking temperature is rising; A small amount of aging asphalt is conducive to improving the fatigue life of recycled asphalt, a large number of mixing will reduce the creep fatigue properties of asphalt. With the increase of the content of aged bitumen, the regenerated SBS modified bitumen has better high temperature anti-rutting performance, but the reclaimed bitumen's low temperature cracking resistance decreases, Creep fatigue performance decreases, SBS distribution becomes uneven and particle sizes are different.

Key words: aging asphalt; SBS modified asphalt; rheology; creep; characteristics

随着国务院关于印发“十三五”节能减排综合工作方案以来,各地都在采取有力措施执行这一工作. 沥青混合料生产和铺筑技术涉及原材料的加工、运输、生产铺筑等工艺,这些工艺里都不可避免地大量使用电能和热能. 经过大量实践和论证后,人们开始关注沥青路面再生利用技术. 该技术由旧沥青混合料经回收、破碎、筛分处理后加入适量再生剂、新集料、新沥青重新拌和而成(需要符合路用性能要求的再生沥青混合料)^[1]. 在欧美国家,沥青路面再生相关技术研究较早,在再生沥青混合料生产工艺及性能研究方面都取得了一定的进展,有些国家还制定了规范和标准^[2]. Hossain 等^[3]用两种不同来源的老化沥青在相同的工艺下添加到普通基质沥青中得到了再生沥青,然后用旋转黏度计测试其性能,结果发现再生沥青的高低温性能都有显著的提高; Khosla 等^[4]的试验表明,随着老化沥青掺量的增加,混合料的硬度都会逐渐增大,但不同来源和老化程度不同的老化沥青会对再生沥青硬度增大的程度是有变化的. 我国将沥青混凝土路面再生利用也取得了很多研究成果:陈静云等^[5-6]研究了高 RAP 掺量的热再生混合料的疲劳寿命,结果表明再生沥青混合料抗拉强度和疲劳抗裂性能随着 RAP 掺量的增加而下降.

沥青路面在复杂的自然环境(阳光、雨水、气温等)和交通荷载的交互作用下,沥青混合料中的沥青会不断地发生老化和硬化. 与基质沥青相比,老化后的沥青具有不同的

化学组分和流变性能. 国内很多学者开展了大量研究:李渊^[7]通过大量试验对 SBS 改性沥青的改性机理进行了研究,对稳定性方法和离析原理进行了分析,考察了老化沥青的三大指标的变化情况;陈华鑫等^[8]通过动态剪切流变仪研究了 SBS 改性沥青老化后的动态力学性能,通过红外线光谱试验发现 SBS 改性沥青的老化存在两种,一种是沥青分子量增大形成结构化的亚结构,一种是 SBS 的老化降解使其分子量减小,指出改性沥青的老化与 SBS 剂量和类型有较大关联;XIAO Feipeng^[9]采用动态剪切流变仪试验研究了老化沥青高掺加量情况下对沥青性能的影响,发现适当掺加老化沥青可以使沥青的高温性能得到一定补偿. 还有学者利用荧光显微镜等设备分析了 SBS 改性沥青的相态结构^[10-15],认为 SBS 改性沥青首先发生凝聚和离析,最后则发生降解反应. 目前大多数对再生沥青的研究都是通过针入度、软化点、延度等常规三大指标和《公路沥青路面再生技术规范》(JTG F41—2008)中的要求来评价再生沥青的性能^[16],对再生沥青的研究还不够细化和具体. 基于此,笔者以老化沥青部分代替 SBS 改性沥青后所得到的再生沥青为研究对象,从沥青的动力黏度、高温性能、低温性能、蠕变性能进行具体研究,并利用荧光显微镜对其性能进行了阐释. 研究表明,随着老化沥青掺量的增加,再生 SBS 改性沥青具有更好的高温抗车辙性能;老化沥青少量掺加有利于提高再生沥青的疲劳寿命,大量

参加会降低沥青的蠕变疲劳性能。

1 材料的选择

1.1 SBS 改性沥青

试验中选择成品 SBS 改性沥青,SBS 的

掺量为 3.5% (与沥青的质量比). 表 1 为 SBS 改性沥青的相关性能指标. 老化沥青按照《公路沥青路面再生技术规范》(JTG F41—2008)^[16]进行抽提得到. 老化沥青的基本性能如表 2 所示.

表 1 SBS 改性沥青基本物理性能

Table 1 Properties of SBS modified asphalt in the test

针入度(25℃,100g,5 s)/ 0.1 mm	软化点 (R & B)/℃	延度 (27℃,5cm/min)/cm	弹性恢复率 (27℃)/%	运动黏度(135℃)/ (mPa·s)
47	51	138	82	1 276

表 2 老化沥青的基本物理性能指标

Table 2 Properties of SBS modified asphalt experienced aged period

针入度(25℃,100g,5s)/ 0.1 mm	软化点 (R & B)/℃	延度 (25℃,5cm/min)/cm	弹性恢复率 (25℃)/%	运动黏度(135℃)/ (mPa·s)	高温性能等级/ ℃
25	69	21.7	16	1 522	89

1.2 再生沥青样品的制备

将 SBS 改性沥青加热到(150±2)℃,转速为 500~600 r/min,分别将 0%,10%,20%和 30% (与沥青质量比,下同)的老化沥青代替 SBS 改性沥青进行均匀拌和(30±5)min,然后室温静置冷却得到再生沥青样品.

1.3 试验方法

1.3.1 再生沥青黏度试验

采用布鲁克菲尔德(由 Brook-field Engineering Inc 美国公司制造)黏度计,按照《沥青延度测定法标准》(GB/T 4508—2010)对测试不同老化沥青掺量在不同温度下的黏度值.

1.3.2 再生沥青高温性能试验

在美国高性能沥青路面(Superpave)沥青结合料性能规范中,通过 DSR 的震荡试验对原样沥青进行车辙因子($G^*/\sin \delta$)的测试,用原样沥青车辙因子($G^*/\sin \delta$)不小于 1.0 kPa 来确定沥青的高温性能等级^[17].

1.3.3 再生沥青低温性能试验

笔者参考美国公路战略研究计划(SHRP)推荐的低温评价方法由于改性沥青的低温性能试验. 采用沥青低温弯曲梁流变仪(BBR)和直接拉伸试验(DT)试验再生沥

青的低温 PG 等级和临界开裂温度.

1.3.4 短期蠕变性能试验

国内外很多学者采用蠕变性能评价沥青的疲劳性能^[18-21]. 笔者采用平行板(直径 25 mm)的应变控制动态剪切流变仪(DSR, AR2000,美国)测定老化沥青介入前后再生沥青的流变行为. 在测试期间,将约 1.0g 样品放置在底板上,覆盖整个表面,然后安装在流变仪中. 将样品加热至熔融状态后,使顶板与样品接触,并对样品进行修整. 测量实际应变,评价沥青的蠕变性能(应变在 30 Pa 以及施加的应力模式加载 1s 载荷和 9s 卸载).

1.3.5 荧光显微镜观察

使用 OLYMPUS 公司制造的光学显微镜(CX41-32c02)观察样品形态. 通过使用少量加热的样品制备改性沥青的压片,并在放大 100~400 倍的显微镜下观察.

2 试验内容和试验结果

2.1 黏度试验

试验采用美国产布鲁克菲尔德黏度计,测试 0~30% 老化沥青掺量的 SBS 改性沥青在不同温度下(120℃,135℃,150℃,165℃和 180℃)的黏度值. 在黏度试验中转

子 27#, 转速 20 r/min. 结果如图 1 所示.

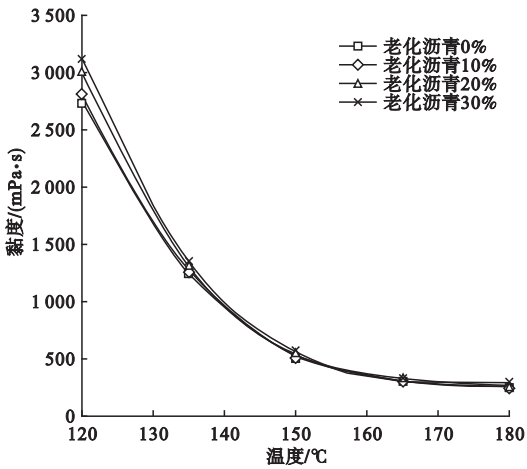


图 1 不同老化沥青掺量下 SBS 改性沥青的黏度值

Fig. 1 The viscosity of SBS modified asphalt with different aged asphalt contents

由图 1 可知,在高温下(温度高于 135 ℃)加入老化沥青对 SBS 改性沥青的黏度影响较小,基本不发生变化.但是,在 120 ℃时,老化沥青掺量为 20% 和 30% 时,与未掺老化沥青相比,样品具有更高的黏度.

另外,可由测得的黏度,选择最佳的评价沥青温度敏感性的指标即黏温指数(VTS),确定再生沥青的温度敏感性^[22].

$$T_k = 273.13 + t, \tag{1}$$

$$VTS = \frac{\lg(\lg \eta_1) - \lg(\lg \eta_2)}{\lg T_{k,1} - \lg T_{k,2}}. \tag{2}$$

式中:η 为黏度值;T_k 为热力学温度;VTS 为黏温性常数.表 3 给出了不同老化沥青掺量下再生沥青的 VTS 值.

表 3 不同老化沥青掺量的 SBS 改性沥青的 VTS 值

Table 3 VTS values of SBS modified asphalt with different aged asphalt contents

老化沥青掺量/%	VTS
0	-2.904 74
10	-2.935 43
20	-2.922 13
30	-2.816 54

从表 3 中可以看出,随着老化沥青掺量

的增加,再生沥青的 VTS 值先减小后增大,表明了老化沥青掺量较大时可以改善再生沥青的温度敏感性.当老化沥青掺量较小时,对再生沥青的温度敏感性影响不利,而掺量为 30% 时,老化沥青改善了再生沥青的温度敏感性.

2.2 高温性能等级

应用用动态剪切流变仪 DSR 对再生沥青进行温度扫描,通过复数模量和相位角的数值变化情况,计算得出车辙因子($G^*/\sin \delta$)的值.计算结果如图 2 所示.

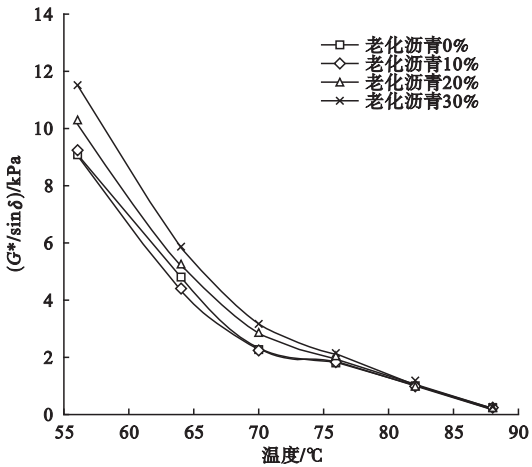


图 2 不同温度和老化沥青掺量下 SBS 改性沥青的 $G^*/\sin \delta$

Fig. 2 $G^*/\sin \delta$ of SBS asphalt with different aged asphalt contents and temperatures

由图 2 可以看出:掺加了 10% 老化沥青的 SBS 改性沥青和未掺的 SBS 改性沥青的抗车辙因子最接近且走势相同,表明老化沥青掺量为 10% 时对 SBS 改性沥青的抗车辙性能几乎没有影响.随着再生沥青掺量的增加,再生沥青的强度增大,车辙因子($G^*/\sin \delta$)的值增加较大,抗车辙能力有所提高.掺加了不同比例老化沥青的 SBS 改性沥青的高温性能等级($G^*/\sin \delta > 1.0$ kPa)都为 82 ℃,表明掺加了老化沥青的 SBS 改性沥青的高温性能等级无明显影响.因此,随着老化沥青掺量的增加,再生 SBS 改性沥青具有更好的高温抗车辙性能.

2.3 再生沥青低温性能

不同老化沥青掺量下的低温性能如表 4 所示. 可以看出, 随着老化沥青掺量的增加, PG 分级不发生变化(均为 $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$), 而临界开裂温度则不断升高. 结果表明, 再生沥青的低温开裂性随着老化沥青掺量的增加而升高. 因此, 在北方低温地区, 老化沥青的掺量宜低不宜高.

表 4 不同老化沥青掺量下低温性能

Table 4 Low temperature property of SBS asphalt with different aged asphalt contents

老化沥青掺量/%	PG 分级/ $^{\circ}\text{C}$	临界开裂温度/ $^{\circ}\text{C}$
0	-22	-28.1
10	-22	-25.7
20	-22	-24.9
30	-22	-24.1

2.4 高温蠕变性能

沥青的蠕变性能见图 3.

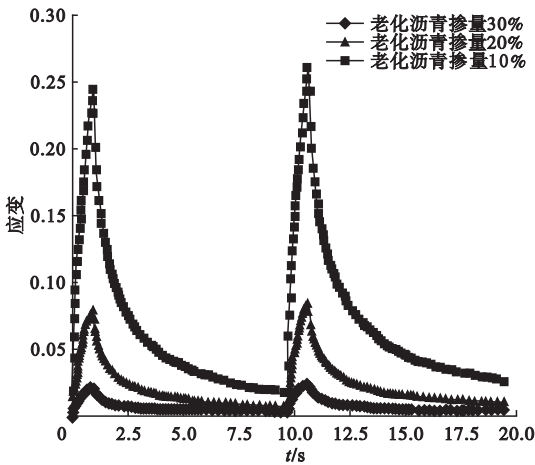


图 3 不同老化沥青掺量下沥青的蠕变性能

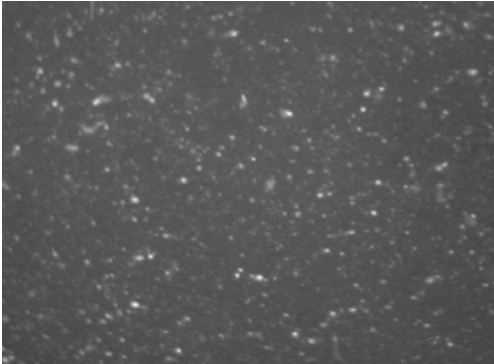
Fig. 3 Creep property of SBS asphalt with different aged asphalt contents

从图 3 可以看出, 掺加 10% 和 20% 老化沥青的蠕变恢复性能很好. 在应力 30 Pa 水平下, 掺加 10% 老化沥青的样品应变为 $0.042\ 788$, 二次载荷作用后恢复到 0.014419 , 应变恢复率为 33.7% ; 观察掺加 20% 老化沥青的样品沥青的应变为

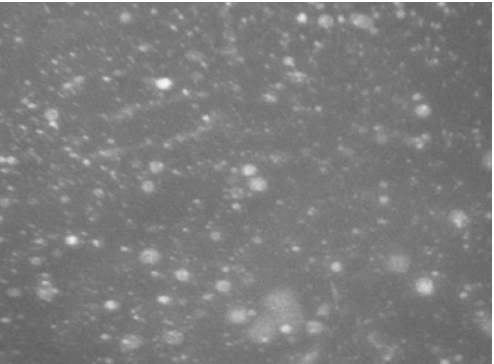
$0.027\ 019$, 第二次荷载作用后恢复到 $0.012\ 35$, 应变恢复率为 45.7% . 而掺加 30% 老化沥青的样品应变恢复率低至 15.2% , 这意味着掺加 10%、20% 老化沥青的样品具有良好的蠕变恢复性能, 可以用来承受道路路面的车辙损伤. 老化沥青少量掺加有利于提高再生沥青的疲劳寿命, 但掺量过多, 则会破坏 SBS 网状结构, 降低沥青的抗疲劳性能, 且随着应变值的增大, 疲劳寿命降低越快, 抗疲劳性能越差.

2.5 荧光显微镜观察

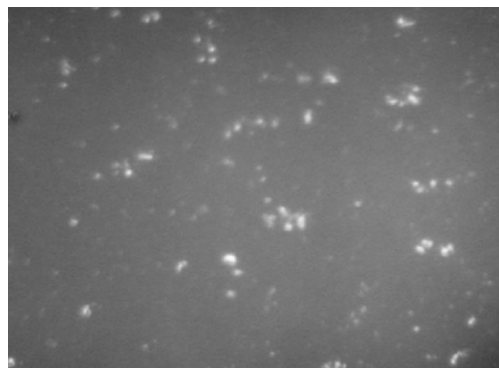
不同老化沥青掺量下沥青的形态结果如图 4 所示. 当未加入老化沥青时, 可以看出 SBS(图中亮点) 分布比较均匀且粒径均一. 随着老化沥青的加入, SBS 分布变得不均匀且粒径大小不一. 这是由于沥青发生老化反应后, 亚砷和羰基含量增加, 老化沥青的掺加占据了 SBS 分子中的分布空间, 迫使 SBS 聚合物的网状结构发生形变乃至破坏.



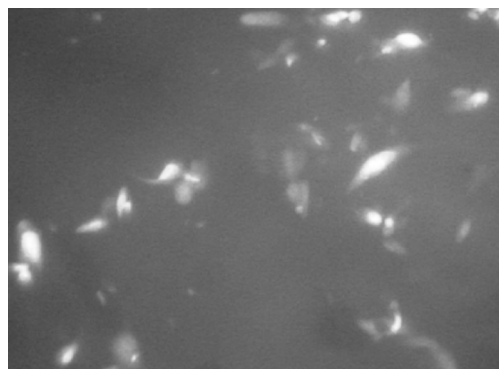
(a) 老化沥青掺量0%



(b) 老化沥青掺量10%



(c) 老化沥青掺量20%



(d) 老化沥青掺量30%

图4 不同老化沥青掺量下沥青荧光显微图(400倍放大倍数)

Fig. 4 Fluorescence micrograph of SBS asphalt with different aged asphalt contents (400 times magnification)

3 结 论

(1)加入老化沥青的再生沥青高温黏度无明显变化,但较低温(小于 135°C)时表现出较大的黏度.且掺加量较大时($\geq 30\%$),有利于改善 SBS 改性沥青的温度敏感性;

(2)掺加了不同比例老化沥青的 SBS 改性沥青的高温性能等级($G^*/\sin \delta$ 1.0 kPa)都为 82°C ,表明掺加了老化沥青的 SBS 改性沥青的高温性能等级无明显影响,随着老化沥青掺量的增加,再生 SBS 改性沥青具有更好的高温抗车辙性能;

(3)再生 SBS 改性沥青的低温开裂性随着老化沥青掺量的增加而升高,在北方低温地区,老化沥青的掺量宜低不宜高;

(4)老化沥青少量掺加有利于提高再生

沥青的疲劳寿命,但掺量过多,则会破坏 SBS 网状结构,降低沥青的抗疲劳性能;

(5)经荧光显微镜观察后可以发现老化沥青的掺加,占据了 SBS 分子中的分布空间,迫使 SBS 聚合物的网状结构发生形变乃至破坏.

参考文献

- [1] 李键. 沥青路面废料再生利用关键技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2008.
(LI Jian. Study on the critical technique of waste material asphalt pavement regeneration [D]. Chongqing :Chongqing University,2008.)
- [2] 马涛,赵永利,黄晓明. 沥青路面厂拌热再生关键技术[M]. 南京:东南大学出版社,2015.
(MA Tao,ZHAO Yongli,HUANG Xiaoming. Key technology for central plant hot recycling of asphalt pavement [M]. Nanjing; Southeast University Press,2015.)
- [3] HOSSAIN Z,SOLANKI P,ZAMAN M. Mechanistic evaluation of recovered materials from recycled asphalt pavement [C]. Oakland: American Society of Civil Engineers, 2012: 120 - 125.
- [4] KHOSLA N P, HARIKRISHNAN N, VISINTINE B, et al. Effect of reclaimed asphalt and virgin binder on rheological properties of binder blends[J]. International journal of pavement research and technology,2012(5):317 - 325.
- [5] 陈静云,马强. 温拌-再生改性沥青 SMA 混合料性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2012,28(2):286 - 290.
(CHEN Jingyun,MA Qiang. Properties of warm mix - recycled modified asphalt SMA mixture [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science),2012,28(2):286 - 290.)
- [6] 陈静云,王峻,刘佳音. 高比例 RAP 热再生沥青混合料低温抗裂性能[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版)2013,29(5):782 - 787.
(CHEN Jingyun, WANG Jun, LIU Jiayin. Study on low temperature anti - cracking performance of hot recycled asphalt mixture at high proportion of RAP [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science),2013,29(5):782 - 787.)
- [7] 李渊. SBS 复合改性沥青的改性机理及路用性能研究[D]. 西安:长安大学,2013.
(LI Yuan. Study on modification mechanism and pavement performance of SBS compound

- modified asphalt [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.)
- [8] 陈华鑫,周燕,王秉纲. SBS 改性沥青老化后的动态力学性能[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2009, 31(4): 1-5.
(CHEN Huaxin, ZHOU Yan, WANG Bing-gang. Dynamic mechanics performance of aged SBS modified asphalt [J]. Journal of Chang'an university (natural science edition), 2009, 29(1): 1-5.)
- [9] XIAO F, PUTMAN B, AMIRKHANIAN S. Rheological characteristics investigation of high percentage RAP binders with WMA technology at various aging states [J]. Construction and building materials, 2015, 98(6063): 315-324.
- [10] 曹青霞,何兆益,李庆. SBS 改性沥青老化研究现状综述[J]. 石油沥青, 2013, 27(4): 1-5.
(CAO Qingxia, HE Zhaoyi, LI Qing. Overview of SBS modified asphalt aging research [J]. Petroleum asphalt, 2013, 27(4): 1-5.)
- [11] 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 phase aging [J]. Journal of tongji university (natural science edition), 2016, 44(1): 95-99.)
- [12] 高榕,赵乐,房士伟. 基于灰色理论的 SBS 改性沥青老化性能的评价方法[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016(9): 57-61.
(GAO Rong, ZHAO Le, FANG Shiwei. Evaluation of aging properties of SBS modified asphalt based on grey theory [J]. Road construction machinery and construction mechanization, 2016(9): 57-61.)
- [13] 陈静云,邱隆亮. SBS 改性沥青老化与再生机理的红外光谱[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(5): 859-864.
(CHEN Jingyun, QIU Longliang. Analysis of the mechanism of aging and regeneration of SBS modified asphalt based on the infrared spectrum [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012, 28(5): 859-864.)
- [14] 赵永利,顾凡,黄晓明. 基于 FTIR 的 SBS 改性沥青老化特性分析[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(5): 620-623.
(ZHAO Yongli, GU Fan, HUANG Xiaoming. Analysis on SBS modified asphalt aging characterization based on fourier transform infrared spectroscopy [J]. Journal of building materials, 2012, 28(5): 859-864.)
- [15] 郝增恒,张肖宁,盛兴跃,等. 超热老化条件下改性沥青的老化机理[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(4): 433-437.
(HAO Zengheng, ZHANG Xiaoning, SHENG Xingyue, et al. Aging mechanism of modified asphalt under epithermal conditions [J]. Journal of building materials, 2009, 12(4): 433-437.)
- [16] 交通运输部公路科学研究院. 公路沥青路面再生技术规范: JTG F41—2008 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
(Research Institute of Highway Ministry of Transport. Technical specifications for highway asphalt pavement recycling: JTG F41—2008 [S]. Beijing: China Communications Press, 2008.)
- [17] American Association of State Highway and Transportation Officials. Standard method of test for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR): AASHTO T315—06 [S]. Washington, D. C.: AASHTO, 2015.
- [18] BUKOWSKI I. The multiple stress creep recovery procedure FHWA-HIF-11-038 [R]. Washington: Department of Transportation Federal Highway Administration, 2011: 21-51.
- [19] 曾诗雅,曹正,朱宗凯. 基于多应力蠕变恢复试验的改性沥青高温性能研究[J]. 公路工程, 2014(1): 246-249.
(ZENG Shiya, CAO Zheng, ZHU Zongkai. Study on high temperature property of modified asphalt binder based on multiple stress creep recovery test [J]. Highway engineering, 2014(1): 246-249.)
- [20] HINTZ C, VELASQUEZ R A, JOHNSON C M, et al. Modification and validation of the linear amplitude sweep test for binder fatigue specification [J]. Journal of the transportation research board, 2011(2207): 99-106.
- [21] HINTZ C, BAHIA H. Simplification of linear amplitude sweep test and specification parameter [J]. Journal of the transportation research board, 2013(2370): 10-16.
- [22] 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.)