

文章编号: 1674-599X(2022)02-0007-06

再生 SBS 改性沥青的蠕变与松弛性能研究

李雪连¹, 郭甲林¹, 崔之靖¹, 叶峻宏¹, 张显安², 田江浩¹

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.湖北交通工程检测中心有限公司, 湖北 武汉 443000)

摘 要:为分析不同掺量再生剂与 SBS 改性沥青对再生沥青的高温蠕变和低温松弛等性能的影响,进行了沥青的针入度、软化点、延度、多重应力蠕变恢复(MSCR)与沥青弯曲蠕变试验(BBR)。试验结果表明:随着再生剂和 SBS 改性沥青掺量的增加,再生沥青的针入度和延度会逐渐升高,而软化点则会逐渐降低。当再生剂掺量为 4%, SBS 改性沥青掺量为 70% 时,再生沥青的针入度、软化点、延度均与 SBS 改性沥青接近。掺入再生剂和 SBS 改性沥青后,再生沥青的不可恢复蠕变柔量增大,而蠕变恢复率和松弛速率均降低。掺入再生剂和 SBS 改性沥青既能改善再生沥青的低温松弛性能,也能损害高温蠕变性能。

关键词:道路工程; 再生沥青; 蠕变; 松弛

中图分类号: U416.26 文献标志码: A

Creep and relaxation performance of reclaimed asphalt using SBS modified

LI Xuelian¹, GUO Jialin¹, CUI Zhijing¹, YE Junhong¹, ZHANG Xian'an², TIAN Jianghao¹

(1.School of Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Hubei Traffic Engineering Testing Center Co., Ltd., Wuhan 443000, China)

Abstract: To analyze the effect of rejuvenator and SBS modified asphalt on the high-temperature creep and low-temperature relaxation performance of recycled asphalt, the penetration, ductility, softening point, multiple stress creep recovery (MSCR) and bending beam rheometer (BBR) test were carried out in this study. The results showed that the penetration and ductility of the recycled asphalt are increased with addition of the rejuvenator and SBS modified asphalt, however the softening point is decreased. When the rejuvenator and SBS modified asphalt content are 4% and 70% respectively, the penetration, ductility, and softening point of recycled asphalt will close to the SBS modified asphalt. When the rejuvenator and SBS modified asphalt is mixed, the non-recoverable creep compliance of recycled asphalt is increased, both the creep recovery rate and relaxation rate are decreased. It can be seen that the low-temperature relaxation performance of recycled asphalt will be improved by adding rejuvenator and SBS modified asphalt, while the high-temperature creep performance is degraded.

Key words: road engineering; recycled asphalt; creep; relaxation

通过再生技术回收利用旧沥青混合料中的老化沥青,可以减少废旧沥青对环境的污染^[1]。由于旧沥青老化会降低沥青的流变性能和黏结性能,使集料表面的沥青薄膜易剥落,造成沥青混合料的抗拉强度不足,影响路面的使用寿命^[2]。

流变性能差限制了再生沥青的推广。许多学

者针对该问题展开了研究,沥青是流变性的黏弹性材料,鉴于蠕变与松弛是其固有特性,可采用蠕变与松弛性能来表征其流变特性^[3]。GOH 等人^[4-5]对从再生沥青路面(reclaimed asphalt pavement, 简称为 RAP)中抽取的回收老化沥青进行多重应力蠕变恢复(multi-stress creep recovery, 简称为

收稿日期: 2021-02-25

基金项目: 湖南省教育厅重点项目(18A130)

作者简介: 李雪连(1978—),女,长沙理工大学副教授,博士。

MSCR) 试验, 分析再生沥青的高温蠕变性能。张勇等人^[6]将再生剂分别按 0%、4%、6%、8% 和 10% 5 个掺配比例加入至 RAP 旧沥青中, 分析了不同再生剂掺量对针入度、延度、软化点和高温稳定性的影响。由于试验条件的限制, 对沥青或再生沥青的松弛性能研究少见。ZHOU 等人^[7]对比分析 RAP 和再生剂对再生沥青高温蠕变性能的影响。薛忠军等人^[8]将弯曲梁流变 (bending beam rheometer, 简称为 BBR) 试验得到的蠕变柔量进行转换, 得到松弛模量, 进而分析其松弛性能。韩森等人^[9]采用动态剪切流变仪 (dynamic shear rheological test, 简称为 DSR) 对再生沥青进行低温频率扫描试验, 基于频率与松弛时间的关系分析了低温松弛性能。王维营^[10]采用 BBR 试验和 Burgers 模型, 分析了不同温度下不同老化沥青掺量时再生沥青的低温松弛性能。肖庆一等人^[11]通过沥青的路用性能指标确定了再生剂的最佳用量, 并对再生沥青的低温抗裂性能进行了试验分析。

这些研究主要针对再生沥青的高温蠕变或低温松弛的某一性能进行分析, 鲜有学者同时对二者进行研究。因此, 本研究拟以不同掺量的再生剂和 SBS 改性沥青同时进行蠕变与松弛试验, 分析再生沥青的流变性能, 以期对再生沥青的循环利用提供借鉴。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

选用英杰维特公司生产的 EVOFLEX 8182 型再生剂, 其技术指标满足《公路沥青路面再生技术规范》(JTG/T5521—2019)^[12]的要求, 沥青采用 SBS 改性沥青 (I-D), 具体指标见表 1。采用 TFOT 进行老化试验, 老化温度、时间分别为 173 °C、10 h, 老化后指标见表 2, 均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)^[13]的要求。

表 1 SBS 改性沥青技术指标

Table 1 Technical indexes of SBS modified asphalt

试验项目	针入度(25 °C)/(0.1 mm)	针入度指数	延度(5 °C)/cm	软化点/°C	运动黏度 135 °C/(Pa·s)	闪点/°C	溶解度/%	弹性恢复(25 °C)/%
试验结果	56	0.16	31	65.5	1.2	257	99.57	84
规范要求	40~60	≥0	≥20	≥60	≤3	≥230	≥99	≥75

表 2 室内老化沥青技术指标

Table 2 Technical indexes of indoor aging asphalt

检测项目	针入度(25 °C)/(0.1 mm)	软化点/°C	延度(5 °C)/cm	延度(15 °C)/cm
实测值	30.9	75.4	5.3	21.5
规范要求	≥10	实测	实测	实测

1.2 再生沥青的制备

参考已有的研究成果的 SBS 改性沥青、再生剂和老化沥青的掺量^[14], 制备 9 组再生沥青, 具体见表 3。制备过程为: 先将再生剂加入老化沥青中, 搅拌 5 min; 再将 SBS 改性沥青加入混合物中, 采用高速剪切仪机械搅拌 20 min, 得到混合均匀的再生沥青。

表 3 再生沥青试件的配比

Table 3 Ratio of recycled asphalt specimen

组号	再生剂/%	SBS 改性沥青/%	组号	再生剂/%	SBS 改性沥青/%
1	3	60	6	4	80
2	3	70	7	5	60
3	3	80	8	5	70
4	4	60	9	5	80
5	4	70			

1.3 试验方法

1.3.1 三大指标试验

沥青的软化点、针入度和延度数值按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)^[15]的方法进行测试。

1.3.2 高温蠕变试验

采用动态剪切流变仪 (dynamic shear rheology, 简称为 DSR) 试验系统进行多重应力蠕变恢复试验。60 °C 时, 先用 0.1 kPa 应力持续加载 10 s, 其中前 1 s 为应力加载时间, 后 9 s 为应力卸载时间, 该过程循环 20 次。然后, 在 3.2 kPa 应力下, 循环 10 次。不同应力水平下的恢复率 R 与不可恢复蠕变柔量 J_{nr} 的计算公式为:

$$R = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_{10}) \times 100}{\varepsilon_1} \quad (1)$$

$$J_{nr0.1} = \frac{\varepsilon_{10}}{0.1} \text{ 或 } J_{nr0.1} = \frac{\varepsilon_{10}}{3.2} \quad (2)$$

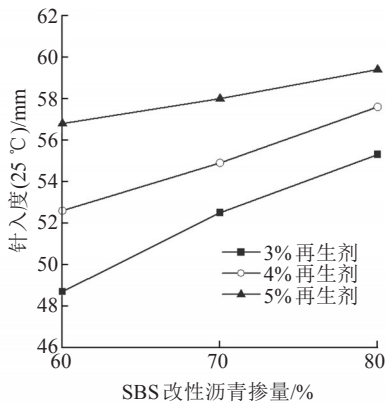
式中: ε_1 为蠕变加载循环 1 s 末的应变值, $\varepsilon_1 = \varepsilon_c - \varepsilon_0$, 其中, ε_c 为蠕变循环完成后的应变值, ε_0 为蠕变开始时的初始应变值; ε_{10} 为恢复结束后的应变值, $\varepsilon_{10} = \varepsilon_r - \varepsilon_0$, 其中, ε_r 为恢复循环完成时的应变值。

1.3.3 低温松弛试验

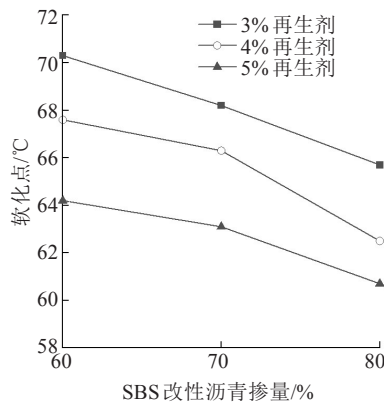
沥青弯曲蠕变试验比松弛试验更易实现, 因此, 基于蠕变柔量和松弛模量之间的卷积关系, 先通过沥青弯曲蠕变试验获得沥青劲度模量, 再换算成沥青蠕变模量, 最后转换为沥青松弛模量。参考文献[15], 在 -10°C 和 -20°C 下, 分别对沥青小梁试件的中间加载应力, 持续240 s, 由计算机软件自动记录, 并计算8、15、30、60、120和240s的沥青劲度模量 S 和蠕变速率 m 。再根据时温等效原理, 以 -10°C 为基准温度、 -20°C 为转换温度, 利用Origin软件对劲度模量主曲线建立CAS模型方程, 见式(3)。最后, 通过式(4)和式(3), 采用MATLAB软件进行迭代计算, 得到沥青的松弛模量。

$$S(T_{\text{ref}}, \tau_h) = S_{\text{glassy}} \left[1 + (\tau_h/\lambda)^{\beta} \right]^{-1/\beta} \quad (3)$$

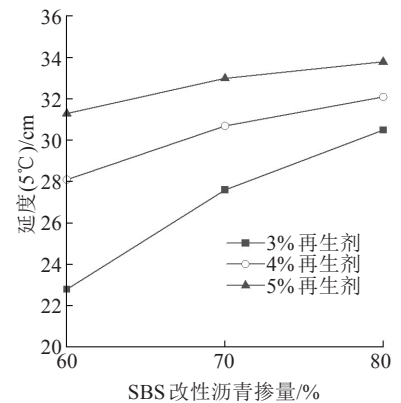
式中: T_{ref} 为荷载作用温度; τ_h 为荷载作用时间; S_{glassy} 、 λ 、 β 分别为参数。



(a) 针入度



(b) 软化点



(c) 延度

图1 再生沥青的三大指标

Fig. 1 Three indexes of recycled asphalt

软化点和针入度反映了沥青对温度的敏感性, 针入度越大, 软化点越小, 沥青的高温抗变形能力就越差^[16]。从图1中可以看出, 再生沥青的针入度和延度随再生剂和SBS改性沥青掺量的增加而增大, 但其软化点却随之减小。表明: 再生剂和SBS改性沥青的掺入会降低再生沥青的高温抗变形能力。而延度反映了沥青的塑性, 延度越大, 沥青的塑性越好。其原因是再生剂中的芳香分能够溶解和分散沥青质, 并能补充沥青老化损失的胶质和轻质组分, 在一定程度上与老化沥青中的亚砷、酮类和羧酸等氧化产物取得了化学平衡。其次, 原样SBS改性沥青的加入后, 再生SBS改性

$$E\left(t_{n+\frac{1}{2}}\right) = \frac{t_{n+1} - \sum_{i=0}^{n-1} E\left(t_{n+\frac{1}{2}}\right) [f(t_{n+1}-t_i) - f(t_{n+1}-t_{i+1})]}{f(t_{n+1}-t_n)} \quad (4)$$

其中, $f(t_{n+1}) = f(t_n) + \frac{1}{2} [J(t_{n+1}) + J(t_n)] (t_{n+1} - t_n)$ 。

式中: $E\left(t_{n+\frac{1}{2}}\right)$ 为 t_n 、 t_{n+1} 时间区间的松弛模量中值; $f(t_n)$ 为0到 t_n 时间内松弛模量的积分值, $f(t_n) = \int_0^{t_n} E(\theta) d\theta$, $f(0)=0$; J 为沥青蠕变柔量; n 为试验测试样点。

2 试验结果与分析

2.1 再生沥青的三大指标

分别对9组不同再生剂掺量的再生沥青进行软化点、针入度和延度三大指标试验, 结果如图1所示。

沥青的SBS改性剂得到了补充, 使SBS与基质沥青间的交联作用得以恢复, 韧性得到了改善。当再生剂和SBS改性沥青的掺量分别为4%和70%时, 再生沥青的常规指标与SBS改性沥青的接近。

2.2 高温蠕变性能

分别在0.1、3.2 kPa应力下对再生沥青进行多重应力蠕变恢复试验, 得到不同应力水平下不可恢复蠕变柔量和恢复率如图2~3所示。

从图2~3中可以看出, 再生沥青在0.1 kPa应力下的 J_{ir} 值小于0.32 kPa应力下的, 而0.1 kPa应力下的 R 值大于0.32 kPa应力下的。表明: 应力大小对再生沥青的高温蠕变性能影响显著。随着再

生剂和 SBS 改性沥青掺量的增加, 再生沥青的 J_{nr} 值逐渐增加, 但 R 值逐渐减小, 表明降低了再生沥青的高温抗变形能力。虽然 SBS 改性沥青在一定程度上改善了老化沥青中破坏的结构, 但由于再生剂的加入, 补充了沥青老化过程中损失的轻质组分, 使硬质的老化沥青变软。因此, 再生沥青的高温抗变形能力比老化沥青的略差。随着再生剂掺量的增加, 再生沥青的 $J_{nr0.1}$ 值增幅变大。相较于 4 % + 70 % 的再生沥青, 4.5 % + 70 % 的再生沥青和 5 % + 70 % 的再生沥青 $J_{nr0.1}$ 值分别增加了 25% 和 30%。

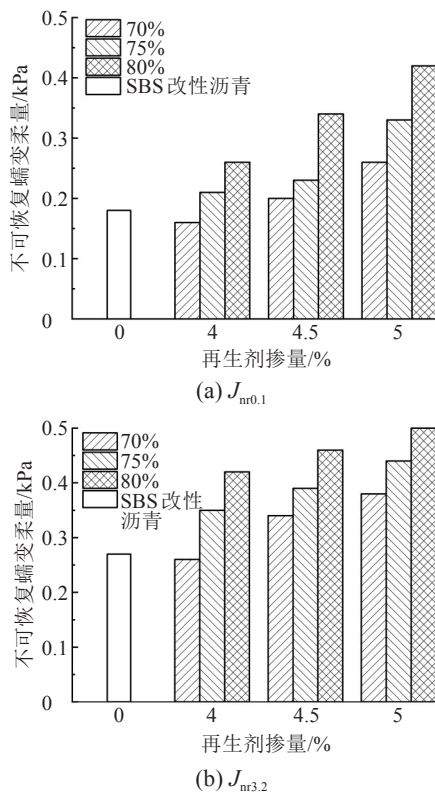


图2 再生沥青的 J_{nr} 值

Fig. 2 The J_{nr} value of recycled asphalt

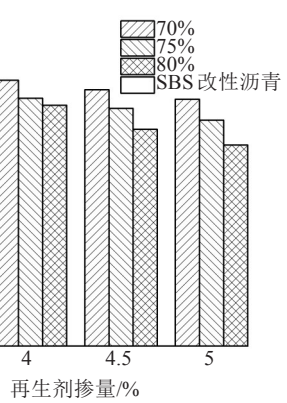
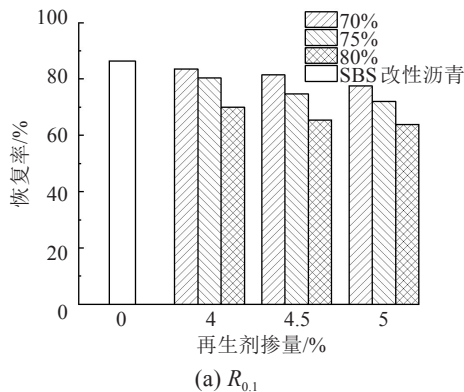


图3 再生沥青的 R 值

Fig. 3 The R value of recycled asphalt

2.3 低温松弛性能

再生沥青在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的劲度模量 S 和蠕变速率 m 试验结果如图 4~5 所示。经式 (4) ~ (5) 转换后, 得到相应的松弛模量, 结果如图 6 所示。

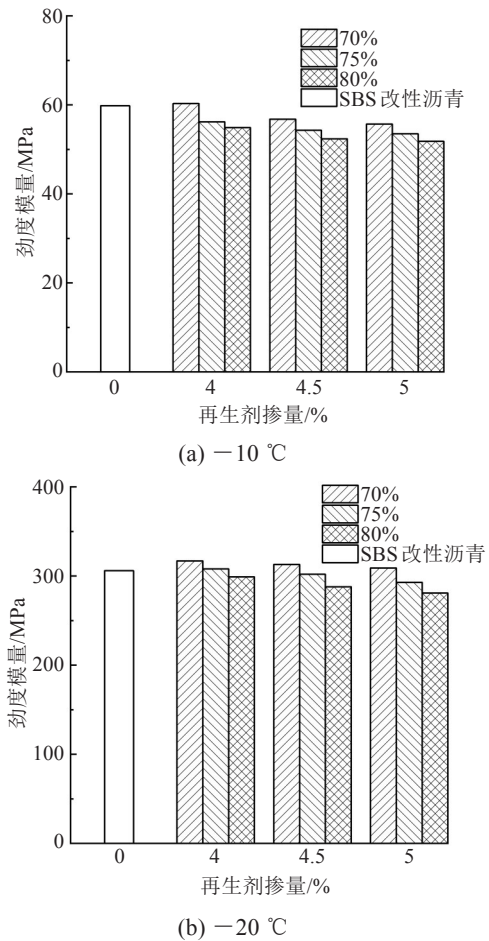


图4 再生沥青的劲度模量

Fig. 4 Stiffness modulus of recycled asphalt

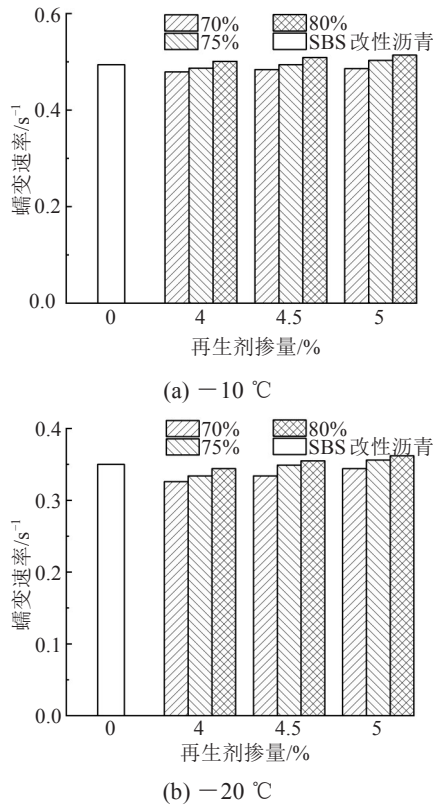


图5 再生沥青的蠕变速率

Fig. 5 Creep rate of recycled asphalt

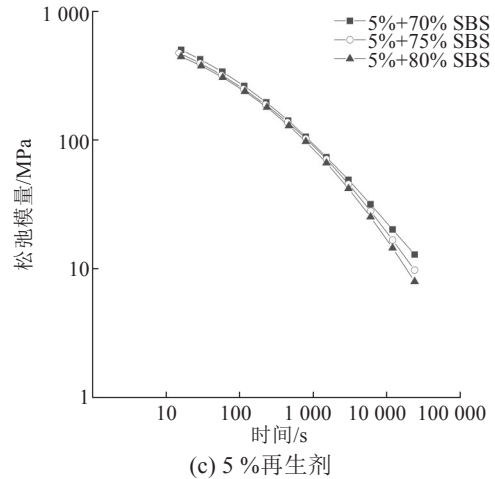
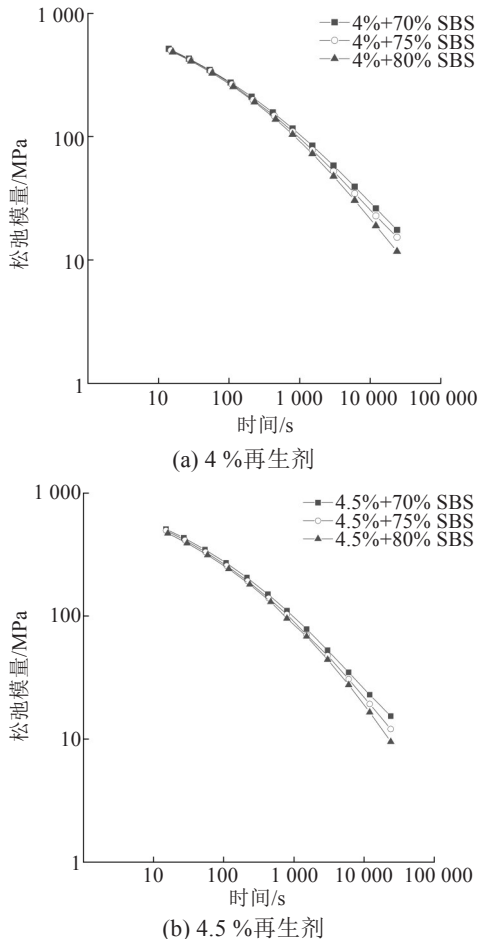


图6 再生沥青松弛模量主曲线

Fig. 6 Principal curve of relaxation modulus of recycled asphalt

从图4~5中可以看出,再生沥青的劲度模量 S 随再生剂和SBS改性沥青掺量的增加而降低,但蠕变速率 m 增大。表明:再生沥青的低温性能得到了改善。从图6中可以看出,再生沥青的松弛模量在初始时间内差异较小,随着时间的延长松弛模量差异变大。随着再生剂和SBS改性沥青掺量的增加,再生沥青的松弛模量逐渐减小,整体松弛作用时间也相应缩短。

由于松弛模量主曲线的斜率(即松弛速率)可用来评价沥青的松弛性能^[17]。从图6中还可以看出,随着再生剂和SBS改性沥青掺量增加,得到了再生沥青的松弛速率逐渐变大,即提高了低温松弛性能。表明:再生剂和SBS改性沥青可以改善再生沥青的低温性能。其主要原因是随着SBS改性沥青的加入,原本因老化而破坏的SBS与沥青之间的网状结构逐渐恢复了,增强了其交联作用,改善了其低温抗裂性能。

3 结论

1) 再生沥青的针入度和延度随再生剂和SBS改性沥青掺量的增加而增大,其软化点减小。当再生剂掺量为4%且SBS改性沥青掺量为70%时,再生沥青的针入度、软化点、延度与SBS改性沥青接近。

2) 再生沥青的不可恢复蠕变柔量随着再生剂和SBS改性沥青掺量的增加而提高,而蠕变恢复率则随之降低。表明:再生沥青的高温蠕变性能

有所降低,再生剂影响更为显著。

3) 再生沥青的松弛速率随着再生剂和SBS改性沥青掺量的增加而增大。表明:再生剂和SBS改性沥青能改善再生沥青的低温松弛性能。

参考文献(References):

- [1] 董雨明,关彦斌,邢鹏. 走近沥青路面材料再生技术[J]. 中国公路, 2020(7): 14-21. (DONG Yuming, GUAN Yanbin, XING Peng. Approaching asphalt pavement material regeneration technology [J]. China Highway, 2020(7):14-21.(in Chinese))
- [2] 王春奇,刘展瑞,曾令康,等. 基于FTIR技术的沥青老化研究[J]. 公路与汽运, 2020(4): 58-62. (WANG Chunqi, LIU Zhanrui, ZENG Linggang, et al. Research on asphalt aging based on FTIR technology [J]. Highways & Automotive Applications, 2020(4):58-62.(in Chinese))
- [3] 陈四来,延西利,李鹏,等. 沥青和沥青胶浆的黏弹性特性[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(3): 12-17. (CHEN Silai, YAN Xili, LI Peng, et al. Viscoelastic properties of bitumen and bituminous mastics [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(3):12-17. (in Chinese))
- [4] GOH S W, YOU Z P. A simple stepwise method to determine and evaluate the initiation of tertiary flow for asphalt mixtures under dynamic creep test [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(11): 3398-3405.
- [5] ALI S A, GHABCHI R, RANI S, et al. Rutting susceptibility of asphalt mixes with high RAP content using rheological and performance-based test methods [C]//International Conference on Highway Pavements and Airfield Technology 2017. Philadelphia, Pennsylvania. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2017:95-106.
- [6] 张勇. 再生剂对高比例RAP热再生沥青混合料路用性能的影响研究[J]. 公路与汽运, 2017(2): 118-121. (ZHANG Yong. Study on the effect of regenerant on road Performance of High Proportion RAP thermal reclaimed asphalt mixture[J]. Highways & Automotive Applications, 2017(2):118-121.(in Chinese))
- [7] ZHOU Z, GU X Y, JIANG J W, et al. Nonrecoverable behavior of polymer modified and reclaimed asphalt pavement modified binder under different multiple stress creep recovery tests [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2018, 2672 (28):324-336.
- [8] 薛忠军,张肖宁,詹小丽,等. 基于蠕变试验计算沥青的低温松弛弹性模量[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2007, 35(2): 64-68. (XUE Zhongjun, ZHANG Xiaoning, ZHAN Xiaoli, et al. Calculation of low-temperature relaxed modulus of elasticity for bitumen via creep test [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science edition, 2007, 35(2):64-68.(in Chinese))
- [9] 韩森,张亚财,高巍,等. 一种基于流变性能平衡设计的沥青再生剂用量确定方法: CN109142694[P]. 20190104. (HAN Sen, ZHANG Yacai, GAO Wei, et al. Asphalt regenerant consumption determining method based on rheological performance balance design: CN109142694A [P]. 20190104.(in Chinese))
- [10] 王维营. 大比例温拌再生沥青及混合料性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018. (WANG Weiying. Performance study on warm mix recycled asphalt binders and mixtures containing high percentages of RAP[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.(in Chinese))
- [11] 肖庆一,王振波,朱俊慧,等. 再生剂对高掺RAP再生沥青混合料性能的影响[J]. 交通科学与工程, 2017, 33(1): 1-5, 37. (XIAO Qingyi, WANG Zhenbo, ZHU Junhui, et al. Effect of rejuvenator on high content RAP hot recycling asphalt performance[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2017, 33(1):1-5, 37.(in Chinese))
- [12] 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/T 5521—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019. (Technical specifications for highway asphalt pavement recycling: JTG/T 5521—2019[S]. Beijing: China Communications Press, 2019.(in Chinese))
- [13] 交通运输部公路科学研究院. 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. Research Institute of Highway Ministry Transport: JTG F40—2004[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.(in Chinese))
- [14] 丁其宇. SBS改性沥青老化及再生性能研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017. (DING Qiyu. Research on aging and recycling performance of SBS modified asphalt [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.(in Chinese))
- [15] 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

(下转第53页)

- 2019,64(9):159-163.(in Chinese))
- [12] 周银,张雪松,丁艳超.无应力状态法在大跨径拱桥施工中的应用[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(8): 6-10, 74. (ZHOU Yin, ZHANG Xuesong, DING Yanchao. Application of stress-free state method in long-span arch bridge construction[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2018, 37(8): 6-10, 74. (in Chinese))
- [13] 周倩,周建庭,马虎,等.钢管拱肋分段吊装扣索一次张拉索力改进算法[J].交通运输工程学报,2020,20(1):92-101. (ZHOU Qian, ZHOU Jianting, MA Hu, et al. Improved algorithm of cable force for one-Time cable tensioning on steel tube arch ribs with segmental hoisting [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020,20(1):92-101. (in Chinese))
- [14] 刘宇飞,李传习,于孟生,等.大跨拱桥拱肋拼装温差效应分析及控制方法[J].交通科学与工程,2020,36(1):63-69. (LIU Yufei, LI Chuanxi, YU Mengsheng, et al. Analysis and control method of temperature difference effect in arch rib assembly of large span concrete-filled steel tube arch bridge[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020,36(1):63-69. (in Chinese))
- [15] 卓小丽.悬拼钢筋混凝土箱拱合理施工索力与拱轴线的优化研究[D].长沙:长沙理工大学,2015. (ZHUO Xiaoli. Research on reasonable construction and the optimization of arch axis in reinforced concrete box arch with cantilever method[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2015. (in Chinese))
- [16] 朱华栋.200 m跨钢筋混凝土拱桥节段预制拼装构形控制及施工索力优化研究[D].长沙:长沙理工大学,2016. (ZHU Huadong. The research on 200 m span reinforced concrete box arch segmental prestressed assembly configuration control and construction of cable force optimization[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2016. (in Chinese))
- [17] 胡大琳,陈定市,赵小由,等.大跨径钢筋混凝土拱桥悬臂浇筑施工控制[J].交通运输工程学报,2016,16(1):25-36. (HU Dalin, CHEN Dingshi, ZHAO Xiaoyou, et al. Construction control of cantilever casting of long span reinforced concrete arch bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(1): 25-36. (in Chinese))

(上接第12页)

- Transport. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011[S]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese))
- [16] 李九苏,唐旭光.土木工程材料[M].长沙:中南大学出版社,2009. (LI Jiusu, TANG Xuguang. Civil engineering materials [M]. Changsha: Central South University Press, 2009.(in Chinese))
- [17] 邹桂莲,秦欢,鄢然,等.基于黏弹特性的SBS改性沥青多次再生效果评价[J].华南理工大学学报(自然科学版),2019,47(7): 75-82.(ZOU Guilian,QIN Huan,YAN Ran,et al.Effect evaluation of multiple recycled SBS modified asphalt based on viscoelastic properties[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition),2019,47(7):75-82.(in Chinese))