

再生沥青调和理论的适用性研究

田小草¹, 卢雪蓉¹, 窦文利², 昝慧芹³, 李慧珍⁴

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 河北省高速公路京雄临时筹建处, 河北 保定 071700;
3. 承德市交通局交通规划设计院, 河北 承德 067000; 4. 河北高速公路集团有限公司, 河北 石家庄 050031)

摘要:【目的】研究再生沥青调和理论的适用性, 为再生沥青路用性能的研究提供理论基础, 促进再生沥青在道路工程实践中的应用和发展。【方法】采用添加相同等级基质沥青的方式, 对不同掺量下的新一旧沥青进行再生试验, 并利用沥青的三大指标、布氏黏度及美国公路战略研究计划(strategic highway research program, SHRP)指标进行研究。【结果】不同基质沥青掺量的再生 70[#] 基质沥青和再生 SBS 改性沥青的针入度对数、高温车辙因子对数及黏度对数与新沥青掺量间的线性精度都在 0.99 以上。【结论】不同基质沥青掺量的再生沥青的针入度、高温车辙因子、黏度、延度都满足调和理论的方程; 再生沥青各温度下的低温蠕变速率、劲度模量与新沥青掺量之间的线性精度较差。

关键词: 再生沥青; 再生试验; SHRP 指标; 线性精度; 适用性

中图分类号: U414

文献标志码: A

Research on the practicability of blending theory of recycled asphalt

TIAN Xiao-ge¹, LU Xue-rong¹, DOU Wen-li², CHANG Hui-qin³, LI Hui-zhen⁴

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Hebei Provincial Expressway Jingxiong Temporary Preparation Office, Baoding 071700, China;
3. Transportation Planning and Design Institute of Chengde Transportation Bureau, Chengde 067000, China; 4. Hebei Expressway Group Co., Ltd., Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: [Purposes] The paper aims to study the practicability of the blending theory of recycled asphalt, provide a theoretical basis for the road performance of recycled asphalt, and promote the application and development of recycled asphalt in road engineering practice. [Methods] By adding the same grade of matrix asphalt, the recycling experiments were carried out on new and old asphalt with different contents, at the same time, the three indexes of asphalt, Brookfield viscosity and American strategic highway research program (SHRP) indexes were used for research. [Findings] For recycled 70[#] matrix asphalt and recycled SBS modified asphalt with different matrix asphalt contents, the linear accuracy between penetration logarithm, high-temperature rutting factor logarithm, viscosity logarithm and new asphalt content is more than 0.99. [Conclusions] The logarithm of penetration, high-temperature rutting factor, viscosity and ductility of recycled asphalt with different matrix asphalt contents all meet the equation of the blending theory; but the linear

收稿日期: 2021-07-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978086); 湖南省交通运输厅科技项目(201905)

通信作者: 田小草(1970—), 男, 教授, 主要从事路面设计理论与方法、路面新材料等方面的研究。

E-mail: tianxiaoge@126.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

accuracy between low-temperature creep rate, stiffness modulus and new asphalt content of recycled asphalt at each temperature is poor.

Key words: recycled asphalt;recycling experiment; SHRP index; linear accuracy; practicability

近年来,可持续发展、绿色交通的观念及五大发展理念自上而下逐渐深入人心,沥青再生也得到了观念上的普及和技术上的支持,其应用日益广泛^[1-4]。沥青路面的再生利用能节约大量的沥青、砂石等原材料,同时有利于处理废料、保护环境,因此将废旧沥青进行再生利用,有利于道路工程的可持续发展。

马涛等^[5]通过复合材料的性能模型及相关沥青组分调和模型的研究,从理论上说明了再生沥青材料性能的可设计性及材料的复合效应。李进^[6]通过凝胶渗透色谱对新沥青、旧沥青、再生沥青进行对比分析,发现再生剂的加入可以使旧沥青分子量的分布变宽,并降低大分子量组分的含量。MAMUN 等^[7]研究了废弃食用油对旧沥青路面再生利用的能力,并采用方差分析法定量分析了废弃食用油对再生沥青性能的影响。范世平等^[8]在老化沥青中掺入生物重油制备出生物重油再生沥青,并根据基本性能试验和动态剪切流变试验研究了生物重油再生沥青的流变性能。高及阳等^[9]为提高再生沥青的性能和再生效果,采用纳米 SiO₂ 对再生沥青进行改性,并研究了再生沥青改性前后使用性能的变化。崔亚楠等^[10]研究了不同再生剂对老化 SBS 改性沥青的再生效果,通过原子力显微镜试验、傅里叶红外光谱试验及热

重试验研究了 SBS 改性沥青的再生机理。PRADHAN 等^[11]采用动态剪切流变仪对再生沥青的流变特性进行了评价,确定了再生剂的适宜用量。WRÓBEL 等^[12]评价了两种改性剂——油菜籽和油酸咪唑啉对道路沥青和再生沥青的影响。

目前,对于再生沥青性能的研究大多集中于添加了再生剂、改性剂的再生沥青上^[13-16]。为研究再生沥青调和理论的适用性,本文首先测试了不同基质沥青掺量下再生沥青的 3 大指标和布氏黏度,通过回归分析得到再生 70[#] 基质沥青与再生 SBS 改性沥青基本性能的变化规律及预估方程。然后,采用高温动态剪切流变试验和低温弯曲梁流变试验,分析了不同新沥青掺量对旧沥青的美国公路战略研究计划(strategic highway research program,SHRP)指标的影响,并对试验数据进行拟合,得到再生预估方程。

1 材料与方法

1.1 基质沥青

本研究采用的是埃索-70[#] 基质沥青及埃索成品 SBS(I-D)改性沥青(以下简称为“70[#] 基质沥青”和“SBS 改性沥青”),经过检测,其具体性能见表 1。

表 1 基质沥青的性能指标
Table 1 Performance indexes of matrix asphalt

沥青种类	指标	试验结果	规范要求	试验方法
70 [#] 基质沥青	针入度(25 ℃, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	67.2	60~80	T0604—2011
	软化点/℃	48.3	≥46	T0606—2011
	延度(15 ℃, 5 cm/min)/cm	132	≥100	T0605—2011
	相对密度(25 ℃)/(g·cm ⁻³)	1.035	—	T0603—2011
	闪点/℃	275	≥260	T0611—2011
SBS 改性沥青	针入度(25 ℃, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	51.6	40~60	T0604—2011
	软化点/℃	69.8	≥60	T0606—2011
	延度(15 ℃, 5 cm/min)/cm	28.0	≥20	T0605—2011
	相对密度(25 ℃)/(g·cm ⁻³)	1.024	—	T0603—2011
	闪点/℃	266	≥230	T0611—2011
	25 ℃弹性恢复/%	83	≥75	T0662—2011

1.2 老化沥青

对 70# 基质沥青及 SBS 改性沥青进行室内模拟试验,使其加速老化,并制备得到旧沥青。制备过程参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》

(JTG E20—2011)^[17],即先采用 SYD-0610 旋转薄膜烘箱(RTFOT)进行短期老化,然后采用 PR9300 压力老化仪(PAV)进行长期老化。所制备的旧沥青的技术指标见表 2。

表 2 旧沥青的技术指标
Table 2 Technical indexes of old asphalt

沥青种类	指标	试验结果	规范要求	试验方法
老化 70# 基质沥青	质量变化/%	−0.19	±0.8	T0610—2011
	残留针入度比(25 ℃)/%	71.70	≥63	T0604—2011
	残留延度 (15 ℃)/cm	39.5	≥15	T0605—2011
老化 SBS 改性沥青	质量变化/%	−0.48	±1.0	T0610—2011
	残留针入度比(25 ℃)/%	82.70	≥65	T0604—2011
	残留延度 (15 ℃)/cm	17.6	≥15	T0605—2011

1.3 再生沥青

本研究根据老化 70# 基质沥青和老化 SBS 改性沥青的再生试验,研究旧沥青的再生规律。将 70# 基质沥青及老化 70# 基质沥青分别放置于 140 和 110 ℃烘箱中,将 SBS 改性沥青和老化 SBS 改性沥青分别放置于 165 和 145 ℃烘箱中,并烘至流动状态。

1.4 再生沥青调和理论模型

根据调和沥青的生产工艺,将一定比例的新沥青与旧沥青混合形成一种新的基质沥青,即再生沥青。在旧沥青中添加与其同等级的新沥青进行试验,结果发现,再生沥青的性能指标与新沥青的掺量之间存在一定的规律。ARRHENIUS 根据调和理论得到两相液体混溶的黏度模型^[18],即:

$$\ln \eta = v_1 \ln \eta_1 + v_2 \ln \eta_2 \tag{1}$$

式中: v_1 、 v_2 分别为混合液体的体积比例; η_1 、 η_2 、 η 分别为两种液体及混溶后液体的黏度。

因此,再生沥青的黏度 η_{mix} 、旧沥青的黏度 η_1 与新沥青的黏度 η_2 之间的关系可表达为:

$$\lg \eta_{\text{mix}} = (1 - \alpha) \lg \eta_1 + \alpha \lg \eta_2 \tag{2}$$

式中: α 为新沥青质量占再生沥青总质量的百分比。

针入度是表征沥青条件黏度的指标。再生沥青针入度 P_{mix} 、旧沥青针入度 P_1 与新沥青针入度 P_2 之间的关系可表示为:

$$\lg P_{\text{mix}} = (1 - \alpha) \lg P_1 + \alpha \lg P_2 \tag{3}$$

国内外学者经过大量的研究发现,沥青的针入度 P 与软化点 T_{RB} 之间的关系可表示为:

$$T_{\text{RB}} = \frac{145}{P^{0.243}} \tag{4}$$

将式(4)带入式(3),可得到再生沥青软化点 T_{mix} 、旧沥青软化点 T_1 与新沥青软化点 T_2 之间的关系,即:

$$T_{\text{mix}} = (1 - \alpha) T_1 + T_2 \tag{5}$$

2 再生沥青的性能

2.1 常规性能

在旧沥青中添加与旧沥青同等级的新沥青进行试验。以 20% 为增量,改变新沥青在再生沥青质量中的占比,得到新沥青质量占比分别为 0%、20%、40%、60%、80% 和 100% 的再生沥青。再生沥青针入度、软化点、延度及黏度与新沥青掺量之间的关系如图 1 所示。

从图 1(a)~1(c)可以看出,再生 70# 基质沥青的黏度对数值、针入度对数值、软化点与新沥青的掺量之间呈线性关系,且相关系数均大于 0.99;再生 SBS 改性沥青的黏度对数值、针入度对数值的变化趋势与再生 70# 基质沥青的基本相同,但其软化点与新沥青掺量之间线性关系的相关系数较小。在图 1(c)中,再生 70# 基质沥青的软化点随着新沥青掺量的增加呈线性递减趋势;再生 SBS 改性沥青的软化点随着新沥青掺量的增加,先减小后增大。这是因为 SBS 改性沥青具有独特的空间网络结构,在添加了 SBS 改性沥青后,老化沥青的胶体结构产生了较大的变化。

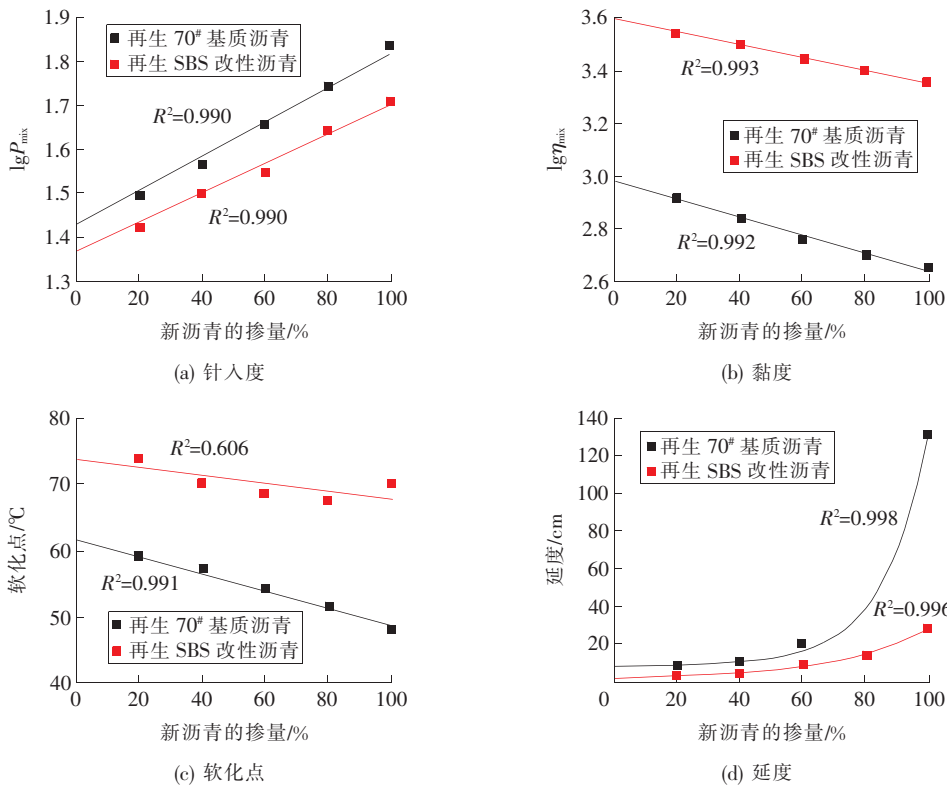


图 1 再生沥青常规指标与新沥青掺量的关系

Fig. 1 Relationship between conventional indexes of recycled asphalt and new asphalt content

从图 1(d)可以看出,在低温延度方面,新旧沥青的再生规律比较复杂,再生沥青的延度与新沥青掺量之间的关系不是简单的线性关系,而是呈指数相关关系。这表明单纯依靠新沥青调节旧沥青的延度,效果不明显。当新沥青的掺量为 80% 时,再生沥青的延度与沥青路用规范的要求仍然有很大的差距。

2.2 高温流变性能

美国 SHRP 计划指出车辙因子可作为评价沥青高温性能的指标,其值越大,沥青的高温抗车辙性能越好。本研究采用 MCR301 型动态剪切流变仪对不同新沥青掺量的再生沥青进行动态剪切流变试验,试验频率为 10 rad/s,温度为 40 ~ 90 ℃。

2.2.1 车辙因子

在 SHRP 计划中用车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 来表征按性能分级的沥青结合料抵抗永久变形的能力。在设计温度下, $G^*/\sin\delta$ 值越大,结合料的抗车辙能力越强。在 40 ~ 90 ℃ 范围内对各沥青样品的车辙因子进行研究,结果如图 2 所示。

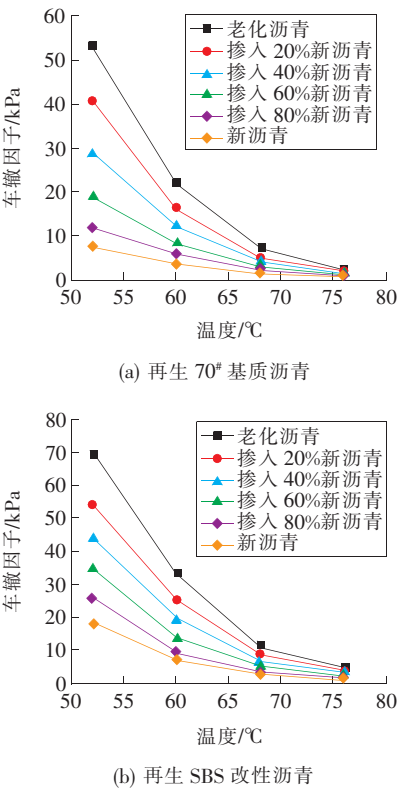


图 2 再生沥青车辙因子随温度的变化

Fig. 2 Variation of rutting factor of recycled asphalt with temperature

从图 2 可以看出,随着温度的升高,再生 70[#] 基质沥青和再生 SBS 改性沥青的车辙因子都在逐渐变小,这是因为温度的升高使沥青逐渐变软,并从固态转变为黏流态,此时沥青更易变形,其车辙因子更小,抗车辙能力更弱。另外,在相同条件下,再生 SBS 改性沥青的车辙因子大于再生 70[#] 基质沥青的车辙因子,说明再生 70[#] 基质沥青的高温性能比再生 SBS 改性沥青的差,即再生 70[#] 基质沥青的抗车辙能力较差。

2.2.2 车辙因子再生规律分析

对不同新沥青掺量下再生沥青的车辙因子进行对数拟合,结果如图 3 所示。

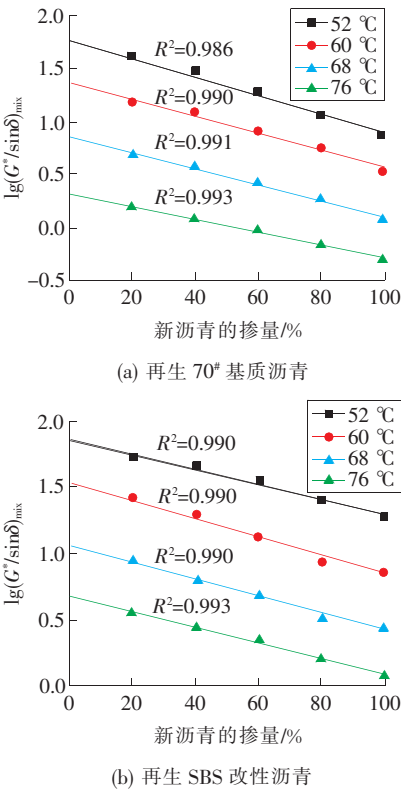


图 3 再生沥青车辙因子随新沥青掺量的变化

Fig. 3 Variation of rutting factor of recycled asphalt with new asphalt content

从图 3 可以看出,在 4 个温度下,无论是 70[#] 基质沥青还是 SBS 改性沥青,其再生沥青的高温车辙因子的对数值与新沥青的掺量之间都具有良好的线性关系,且相关系数都大于 0.99,说明再生沥青调和理论在研究再生沥青高温车辙因子方面的适用性很强。结合图 3 的拟合结果及相关研究成果,得到新旧沥青车辙因子的性能复合方程为:

$$\lg(G^*/\sin\delta)_{\text{mix}} = (1 - \alpha)\lg(G^*/\sin\delta)_1 + \alpha\lg(G^*/\sin\delta)_2 \tag{6}$$

式中:α 为新沥青质量占再生沥青总质量的百分比;(G^{*}/sinδ)_{mix} 为再生沥青的车辙因子;(G^{*}/sinδ)₁ 为旧沥青的车辙因子;(G^{*}/sinδ)₂ 为新沥青的车辙因子。

2.3 低温蠕变性能

美国 SHRP 计划中用由低温小梁弯曲试验(BBR)测得的劲度模量 S 及蠕变速率 m 来评估沥青的低温性能。本研究采用美国 CANNON 公司生产的 TE-BBR-F 型沥青弯曲梁流变仪在 -9、-15 和 -21 °C 3 个温度下,对不同新沥青掺量的再生沥青试样进行 BBR 试验。对再生沥青不同温度下的蠕变速率 m 和劲度模量 S 的对数进行线性拟合,结果如图 4~5 所示。

从图 4~5 可以看出,再生沥青各温度下的低温蠕变速率 m、劲度模量的对数 lgS 与新沥青的掺量之间呈线性关系,其拟合方程见式(7)~(8)。但是再生 70[#] 基质沥青和再生 SBS 改性沥青各温度下拟合方程的相关系数 R² 较小。

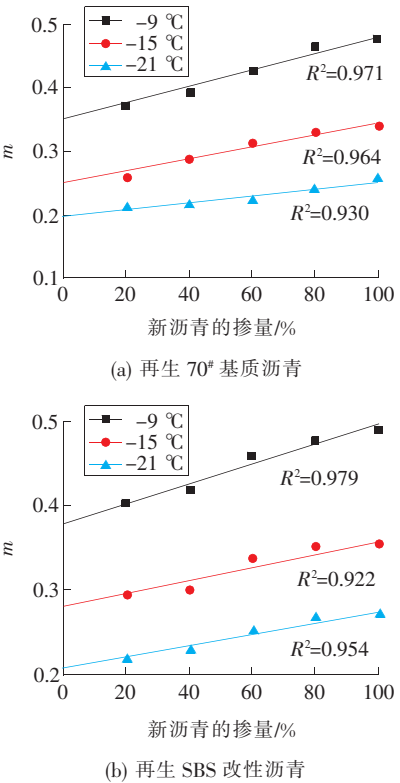


图 4 再生沥青蠕变速率随新沥青掺量的变化

Fig. 4 Variation of creep rate of recycled asphalt with new asphalt content

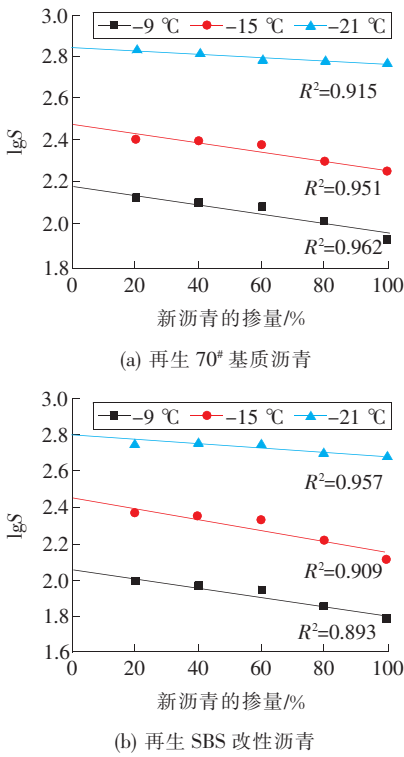


图 5 再生沥青劲度模量随新沥青掺量的变化

Fig. 5 Variation of stiffness modulus of recycled asphalt with new asphalt content

$$m_{\text{mix}} = (1 - \alpha)m_1 + \alpha m_2 \quad (7)$$

$$\lg S_{\text{mix}} = (1 - \alpha)\lg S_1 + \alpha \lg S_2 \quad (8)$$

式中: α 为新沥青质量占再生沥青总质量的百分比; m_{mix} 为再生沥青的蠕变速率; m_1 为旧沥青的蠕变速率; m_2 为新沥青的蠕变速率; S_{mix} 为再生沥青的劲度模量; S_1 为旧沥青的劲度模量; S_2 为新沥青的劲度模量。

3 结论

在室内制备长期老化的 70# 基质沥青和 SBS 改性沥青,然后掺入同等级的新沥青对其进行再生;研究了不同掺量的新沥青对再生 70# 基质沥青和再生 SBS 改性沥青常规性能指标以及 SHRP 指标的影响,并对再生沥青调和理论的适用性进行了研究。得到的主要结论如下:

1) 掺入新沥青能使老化沥青的各项常规指标在一定程度上得以恢复,实现老化沥青的再生。

2) 在再生沥青的常规性能方面:① 再生 70# 基质沥青的黏度对数值、针入度对数值、软化点与新沥青的掺量之间呈显著的线性关系,这说明上

述三个指标适用于再生沥青调和理论;② 再生 SBS 改性沥青的黏度对数值、针入度对数值与新沥青掺量之间的线性关系显著,这说明其适用于再生沥青调和理论,而软化点与新沥青掺量的拟合精度较低,不适用于调和理论;③ 再生沥青的延度与新沥青掺量之间的拟合精度高,适用于再生沥青调和理论。

3) 在再生沥青 SHRP 指标方面:① 无论是 70# 基质沥青还是 SBS 改性沥青,其再生沥青高温车辙因子的对数值与新沥青掺量之间的拟合精度均在 0.99 以上,因此高温车辙因子适用于再生沥青调和理论;② 再生沥青各温度下低温蠕变速率、劲度模量的对数值与新沥青掺量按调和理论计算的精度较低,因此再生沥青调和理论的适用性较差。

〔参考文献〕

- [1] 王真. 沥青再生的升级之路[J]. 中国公路,2019(7): 33-36.
WANG Zhen. Upgrading of asphalt recycling [J]. China Highway,2019(7):33-36.
- [2] 王争愿,李九苏,娄梦雷,等. RAP 掺量对反应型冷拌再生沥青混合料性能的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2019,16(4):35-41.
WANG Zheng-yuan,LI Jiu-su,LOU Meng-lei,et al. Effect of RAP content on performance of reactive cold mix recycled asphalt mixture [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science),2019,16(4):35-41.
- [3] ZAHOOR M,NIZAMUDDIN S,MADAPUSI S,et al. Sustainable asphalt rejuvenation using waste cooking oil: a comprehensive review[J]. Journal of Cleaner Production,2021,278:123304.
- [4] YU Q,FENG G,ZHEN L,et al. Simulation of the field aging of asphalt binders in different reclaimed asphalt pavement (RAP) materials in Hong Kong through laboratory tests[J]. Construction and Building Materials,2020,265:120651.
- [5] 马涛,黄晓明,张久鹏. 基于材料复合理论的老化沥青再生规律[J]. 东南大学学报(自然科学版),2008(3):520-524.
MA Tao,HUANG Xiao-ming,ZHANG Jiu-peng. Recycling law of aged asphalt based on composite theory of material[J]. Journal of Southeast Universi-

- ty(Natural Science Edition),2008(3):520-524.
- [6] 李进. 沥青再生剂扩散行为及其影响因素研究[D]. 北京:中国石油大学,2010.
LI Jin. Study on the diffusion behavior of asphalt rejuvenator and its influence factors[D]. Beijing:China University of Petroleum,2010.
- [7] MAMUN A A,AL-ABDUL W. Comparative laboratory evaluation of waste cooking oil rejuvenated asphalt concrete mixtures for high contents of reclaimed asphalt pavement[J]. International Journal of Pavement Engineering,2020,21(11):1 297-1 308.
- [8] 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. [2021-09-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20210204.1124.016.html>.
FAN Shi-ping, ZHU Hong-zhou, ZHONG Wei-ming. Rheological performance evaluation of heavy bio-oil recycled asphalt based on DSR test[J/OL]. Journal of Building Materials. [2021-09-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20210204.1124.016.html>.
- [9] 高及阳,曾梦澜,孙志林. 改性纳米 SiO_2 对再生沥青胶结料性能的影响[J]. 土木工程学报,2019,52(3):120-128.
GAO Ji-yang, ZENG Meng-lan, SUN Zhi-lin. Effects of nano- SiO_2 with modified surface on properties of recycled asphalt binder[J]. China Civil Engineering Journal,2019,52(3):120-128.
- [10] 崔亚楠,崔树宇,郭立典. 废机油再生 SBS 改性沥青性能及机理研究[J/OL]. 建筑材料学报. [2021-09-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.tu.20210311.1036.002.html>.
CUI Ya-nan, CUI Shu-yu, GUO Li-dian. Research on performance and mechanism of recycled SBS modified asphalt[J/OL]. Journal of Building Materials. [2021-09-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.tu.20210311.1036.002.html>.
- [11] PRADHAN S K,SAHOO U C. Evaluation of recycled asphalt mixtures rejuvenated with Madhuca longifolia(Mahua) oil[J]. International Journal of Pavement Research and Technology,2020,14:43-53.
- [12] WRÓBEL M,WOSZUK A,RATAJCZAK M,et al. Properties of reclaimed asphalt pavement mixture with organic rejuvenator[J]. Construction and Building Materials,2020,271:121514.
- [13] 孙春阳,曲恒辉,张圣涛,等. 不同改性剂改性基质沥青性能试验[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2019,16(2):28-35.
SUN Chun-yang, QU Heng-hui, ZHANG Sheng-tao,et al. Experimental study on properties of asphalt modified by different modifiers[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science),2019,16(2):28-35.
- [14] TARSI G,TATARANNI P,SANGIORGI C. The challenges of using reclaimed asphalt pavement for new asphalt mixtures: a review[J]. Materials,2020,13(18):4052.
- [15] 孔林,何兆益,蒋斌,等. 基于模糊层次分析法的沥青再生剂组分比选[J/OL]. 公路工程. [2021-10-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1481.U.20210901.0910.002.html>.
KONG Lin, HE Zhao-yi, JIANG Bin,et al. Comparison and selection of asphalt recycling agent components based on fuzzy analytic hierarchy process[J/OL]. Highway Engineering. [2021-10-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1481.U.20210901.0910.002.html>.
- [16] BAQERSAD M,ALI H. Recycling of RAP using nanoclay modified asphalt binder[J]. International Journal of Pavement Research and Technology,2021,14(6):778-788.
- [17] 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 methods of bitumen and bituminous mixture of highway engineering:JTG E20—2011[S]. Beijing:China Communications Press,2011.
- [18] 郑南翔,侯月琴,纪小平. 老化沥青再生性能的预估分析[J]. 长安大学学报(自然科学版),2009,29(3):6-10.
ZHENG Nan-xiang, HOU Yue-qin, JI Xiao-ping. Prediction analysis of recycled performance of aged asphalt[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition),2009,29(3):6-10.

(编辑 石月珍)