

《路面工程·服役性能及耐久性》专栏

【编者按】我国道路工程的发展逐步进入到大养护阶段,全国高速公路平均每年将产生近4 000万t的废旧沥青混合料,而资源综合利用率仅为30%左右。废旧沥青混合料处理不当会严重污染土壤以及地下水资源,也会造成资源浪费。再生技术主要是通过将旧沥青路面铣刨回收,并在其中掺加新集料、新沥青以及再生剂,通过拌合制备成符合规范要求的再生沥青混合料。温拌再生技术作为节能减排的重要方式,能够提高旧沥青混合料的再生掺量,降低温室气体排放,改善道路性能和提高施工效率,对于道路工程的绿色可持续发展具有重大意义。然而,温拌技术在应用过程中仍然存在一定的问题和挑战。

在此背景下,本期《路面工程·服役性能及耐久性》专栏重点报道了甲基苯乙烯共聚物(styreneic methyl copolymer, SMC)再生剂的温拌再生沥青性能以及微观特性的多个热点方向的研究工作,包括SMC再生沥青的高温流变性能、低温抗裂性能、温拌再生机理以及微观形貌分析等,旨在为温拌再生技术的广泛应用提供参考和借鉴,同时为旧沥青混合料的高值化利用和绿色道路的发展提供支撑。

专栏主编简介:

吕松涛,长沙理工大学教授,博导,国家杰出青年科学基金获得者,教育部青年长江学者,交通运输部中青年科学创新领军人才等。长期从事长寿命道路的设计理论与方法、智慧道路设计建造运维中的数字化技术、道路长期服役性能数字孪生技术等领域的理论基础、科技开发与工程实践等工作,主持、参与国家重点研发计划项目等国家级与省部级重大项目10余项,建立了复杂服役环境下沥青路面材料与结构服役性能的演变模型等理论成果,发表期刊论文150余篇(SCI收录100余篇,ESI高被引6篇),授权国家发明专利19项,主参编技术标准8部,获国家科技进步二等奖1项、省部级特等奖1项、一等奖6项。

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20220514001

文章编号:1672-9331(2024)01-0001-11

引用格式:吕松涛,杨硕,范涛,等.SMC再生SBS沥青的流变性能和微观特性研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2024,21(1):1-11.

Citation: LYU Songtao, YANG Shuo, FAN Tao, et al. Study on rheological properties and microscopic characteristics of SMC reclaimed SBS Asphalt [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(1): 1-11.

SMC再生SBS沥青的流变性能和微观特性研究

吕松涛¹, 杨硕¹, 范涛², 丁沙², 彭幸海¹

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114;2.武汉市汉阳市政建设集团有限公司,湖北 武汉 430050)

摘要:【目的】探究新型温拌再生剂甲基苯乙烯共聚物(styreneic methyl copolymer, SMC)对老化苯乙烯系热塑性弹性体(styrene butadiene styrene, SBS)改性沥青的再生效果和再生机理。【方法】首先,在室内制备不同老化程度的沥青。然后,采用SMC再生剂对不同老化程度的SBS改性沥青进行再生。接着,对再生后的SBS改性沥青进行动态剪切流变和低温弯曲蠕变试验,以评价其流变性能。最后,开展红外光谱试验以揭示其作用机理,进行电镜扫描试验以验证SMC再生剂的再生效果。【结果】SMC再生剂会降低老化SBS改性沥青的车辙因子,降低老化SBS改性沥青的恢复率,同时会使老化SBS改性沥青的低温性能得到极大提升。SMC再生剂未与SBS改性沥青发生化学反应,两者仅为物理共混。同时,SMC再生剂能够弥补沥青因老化产生的裂缝。【结论】SMC再生剂对老化SBS改性沥青具有较好的修复效果,能够为沥青的再生提供一种新的途径。

关键词:道路工程;温拌再生剂SMC;SBS改性沥青;不同老化程度;流变性能;微观特性

中图分类号:U414

文献标志码:A

收稿日期:2022-03-16;修回日期:2022-05-16;接受日期:2022-05-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078063)

通信作者:吕松涛(1979—)(ORCID:0000-0003-0426-5033),男,教授,主要从事耐久性沥青路面结构设计、道路新材料研究,E-mail:lst@csust.edu.cn

投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

Study on rheological properties and microscopic characteristics of SMC reclaimed SBS asphalt

LYU Songtao¹, YANG Shuo¹, FAN Tao², DING Sha², PENG Xinghai¹

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

2. Wuhan Hanyang Municipal Construction Group Co., Ltd., Wuhan 430050, China)

Abstract: [Purposes] This paper aims to explore the new type of warm mixing recycling agent of styreneic methyl copolymer (SMC) recycling effect and mechanism of aging styrene butadiene styrene (SBS) modified asphalt. [Methods] Firstly, the old asphalt with different aging degrees was prepared indoors. Secondly, a SMC recycling agent was used to regenerate the styrene butadiene styrene (SBS) modified asphalt with different aging degrees. Then, dynamic shear and flexural creep tests were carried out on SMC regenerated asphalt to evaluate its rheological properties. Finally, the mechanism was revealed by the Fourier transform infrared reflection test, and the SMC recycling effect was evaluated by the scanning electron microscope test. [Findings] The results show that the SMC recycling agent reduces the rutting index and the recovery rate of aging asphalt, furthermore, it significantly improves the low-temperature performance of aging asphalt. The SMC recycling agent and aging asphalt are physically blended without chemical reaction. Besides, SMC recycling agent can compensate the cracks caused by asphalt aging. [Conclusions] The SMC recycling agent has a better repair effect on aging asphalt, which can provide a new way for asphalt regeneration.

Key words: road engineering; warm mixing recycling agent SMC; SBS modified asphalt; different aging degrees; rheological properties; microscopic characteristics

Foundation item: Project (52078063) supported by the National Natural Science Foundation of China

Corresponding author: LYU Songtao (1979—) (ORCID:0000-0003-0426-5033), male, professor, mainly engaged in research of structural design of durable asphalt pavement and new road materials. E-mail:lst@csust.edu.cn

0 引言

沥青路面是目前应用最广泛的路面类型,也是使用耗材最多的结构之一^[1-3]。“双碳”目标的提出使人们对环保和可持续发展愈加重视。在道路工程中,沥青混合料再生技术得到越来越多的关注和应^[4-5]。厂拌热再生技术是目前最常用的再生技术,但因为该技术要求较高的拌合温度,且旧沥青混合料(reclaimed asphalt pavement, RAP)掺量低于30%,限制了该技术的推广^[6-8]。为改善热拌沥青混合料拌合温度高、能源消耗大、沥青二次老化等的缺点,提高旧料掺量,温拌再生剂被应用于热再生技术^[9]。温拌沥青在生产过程中能够降低沥青黏度和拌合温度,防止高温加热^[10-11],解

决了热拌沥青路面污染和消耗大的难题。

甲基苯乙烯共聚物(styreneic methyl copolymer, SMC)再生剂是一种新型的温拌再生剂^[12-14]。SMC温拌沥青技术具有施工温度低、存储时间长、路用性能优良、节能减排效果显著等诸多优点^[15-16]。黄劲^[17]研究了SMC改性沥青混合料的合成设计、性能及机理,明确了SMC改性沥青混合料的强度变化规律及成型机理。闫瑾等^[18]使用SMC再生剂对RAP进行高掺量再生,证实了SMC再生高掺量旧料的技术可行性。梁清丽^[19]通过室内试验发现SMC再生剂在降低再生沥青混合料拌合温度时,可使旧料掺量提高至60%。综上可知,SMC再生剂在道路行业具有极大的应用潜力,但对其的研究多集中在沥青混合料,尚缺乏SMC再生沥青的针对性研究,因此有必要探究SMC对再

生沥青性能的影响,为SMC再生剂进一步应用到实际工程提供理论依据。

本研究首先对苯乙烯系热塑性弹性体(styrene butadiene styrene, SBS)改性沥青进行了不同程度的老化,再加入不同掺量的SMC再生剂再生老化沥青,通过动态剪切流变试验以及低温弯曲蠕变试验分析SMC再生沥青的流变性能,通过建立相应的可视化曲面和模型,得到SMC再生剂的最佳掺量。最后采用红外光谱试验和电镜扫描试验分析了SMC再生剂的作用机理以及再生效果。

1 材料与试验

1.1 SBS 沥青

本研究采用SBS(I-D)沥青,对其进行测试的结果列于表1。

表1 SBS(I-D)沥青试验结果
Table 1 Test results of SBS (I-D) asphalt

性能指标	检测结果	技术指标
针入度(25℃, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	52	40~60
延度(5 cm/min, 5℃)/cm	35	≥25
软化点/℃	83.2	≥76
运动黏度(135℃)/(Pa·s)	2.45	≤3

1.2 SMC再生剂

本研究采用SMC-Ⅲ型再生剂,对其进行测试的结果列于表2。

表2 SMC再生剂试验结果
Table 2 Test results of SMC recycling agent

性能	检测结果
外观	黄褐色黏稠状液体
密度/(g·cm ⁻³)	0.88
闪点(开口杯法)/℃	70
橡胶烃含量/%	84
黏度(25℃)/(Pa·s)	0.71

1.3 老化及再生沥青制备

采用旋转薄膜烘箱试验(rolling thin film oven test, RTFOT)制备短期老化沥青,试验温度为163℃,时间为85 min。长期老化试验采用压力老化试验(pressure aging vessel, PAV),其空气压力为2.1 MPa,试验温度为100℃。在短期老化的基础上进行压力老化试验,压力老化时间分别为0、5、10、15和20 h,分别记为PAV0h、PAV5h、PAV10h、

PAV15h、PAV20h。将SMC再生剂以3%、6%、9%、12%四种掺量分别加入老化沥青中,并进行剪切,剪切速率控制在1 500~2 500 r/min,时长控制在15~20 min。老化沥青加热温度控制在150℃。在根据相关规范加入SMC再生剂后,老化沥青加热温度控制在130℃,得到SMC再生沥青。

1.4 流变性能测试

1) 温度扫描。

利用动态剪切流变仪对沥青进行温度扫描。采用应变控制荷载,正弦振荡荷载施加频率为10 rad/s±0.1 rad/s。温度扫描范围为40~90℃,升温速率为2℃/min。

2) 多重应力蠕变恢复试验。

在温度扫描的基础上,选用70℃作为多重应力蠕变恢复试验(multiple stress creep recovery, MSCR)的试验温度来评价其高温性能。采用应力控制模式,在0.1和3.2 kPa应力水平下连续测试,应力加载持续1 s后零应力恢复9 s。

3) 低温弯曲蠕变试验。

通过弯曲梁流变仪(bending beam rheometer, BBR)试验测得的60 s时的劲度模量 S 和蠕变速率 m 来反映沥青的低温性能。试样采用尺寸为长127.00 mm、厚6.35 mm、宽12.70 mm的小梁,试验温度为-18℃。

1.5 微观特性试验

1) 红外光谱。

红外光谱试验能够在分子水平上判断沥青中特征官能团和组分吸收光谱的差异,并以此来推断沥青的改性机理。试验采用的波长范围是4 000~500 cm⁻¹,分辨率为4 cm⁻¹,重复扫描32次。

2) 电镜扫描。

为了分析SMC再生剂对老化沥青的再生效果,采用电镜扫描试验,观察老化前后及再生后沥青的表观形貌。在进行试验前,将沥青切成小块,然后喷金15 s。

2 结果

2.1 流变性能

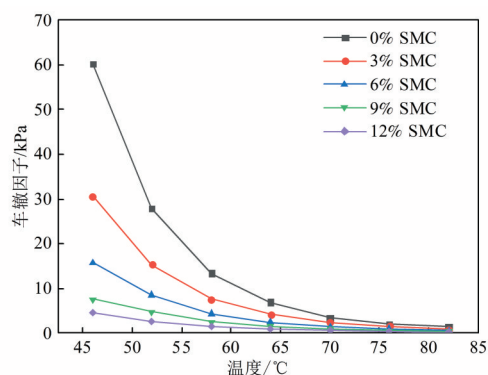
2.1.1 温度扫描

对老化沥青、SMC再生沥青进行温度扫描试验,选取52、58、64、70、76和82℃作为试验温度,

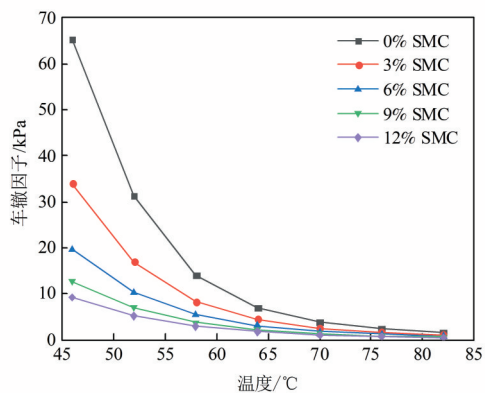
以车辙因子作为判断指标进行分析。沥青的车辙因子变化规律如图1所示。

图1表明,沥青的车辙因子会随其老化程度的加深明显增大,这是由沥青变硬、变脆造成的。沥青的车辙因子随着温度的升高逐渐降低,这是由于温度的提升会使沥青由固态向黏流态转变,从而导致沥青车辙因子下降。

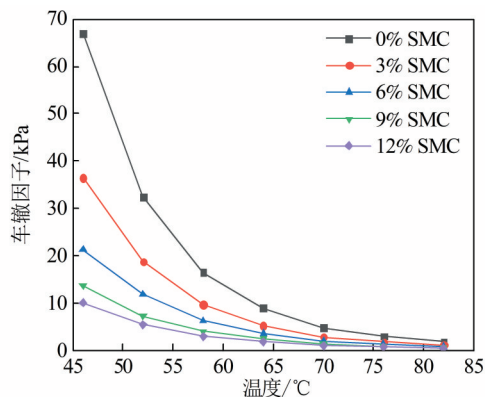
随着再生剂掺量的增加,沥青的车辙因子逐渐降低,这是因为再生剂的掺入降低了沥青的黏结力,沥青更容易在外力的作用下产生变形,从而表现为车辙因子的下降。



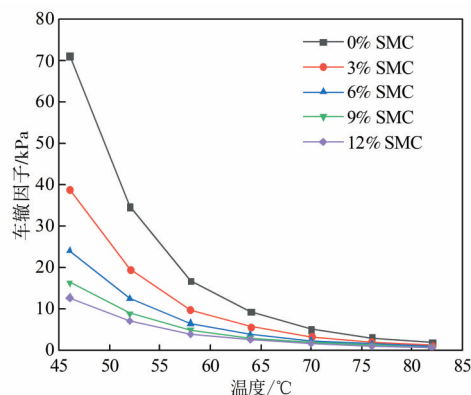
(a) PAV0h



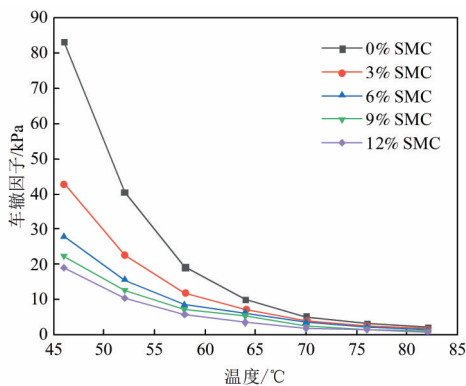
(b) PAV5h



(c) PAV10h



(d) PAV15h



(e) PAV20h

图1 沥青车辙因子

Fig. 1 Rutting indexes of asphalt

选择沥青在70℃时的车辙因子对沥青的高温性能进行分析。沥青在70℃时的如图2所示,拟合方程如式(1)所示。

$$G^*/\sin\delta = 3.3300 - 0.4578x + 0.0647y + 0.0196x^2 - 0.0025xy + 0.0018y^2 \quad (1)$$

式中: x 为再生剂掺量; y 为压力老化时间; $G^*/\sin\delta$ 为车辙因子。

由图2可以看出,再生剂的掺入会使沥青车辙因子显著下降。对于PAV20h沥青,掺入12%的SMC再生剂后,其车辙因子为原来的39.7%,而对

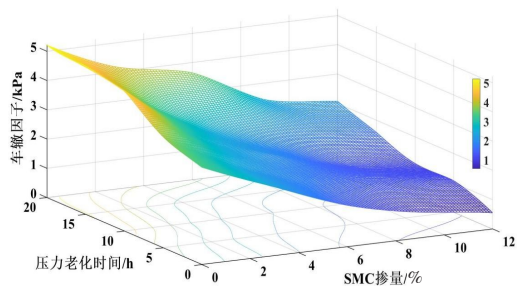


图2 沥青在70℃时的车辙因子

Fig. 2 Rutting indexes of asphalt at 70℃

于PAV15h、PAV10h、PAV5h、PAV0h沥青,掺入12%的再生剂后,其车辙因子分别为原来的31.2%、22.8%、28.2%、16.5%。

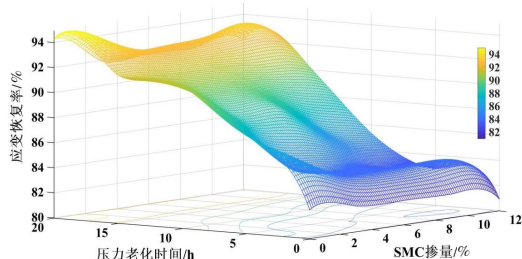
2.1.2 MSCR

沥青的应变恢复率如图3所示,拟合方程如式(2)、(3)所示。

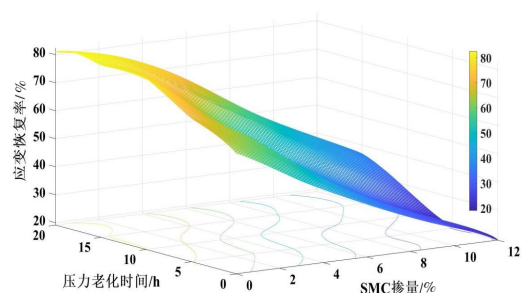
$$R_{0.1} = 82.3000 - 0.4431x + 0.7332y + 0.0145x^2 + 0.0026xy - 0.0096y^2 \quad (2)$$

$$R_{3.2} = 62.3000 - 4.2000x + 1.6860y + 0.0228x^2 - 0.0096xy - 0.0255y^2 \quad (3)$$

式中: $R_{0.1}$ 和 $R_{3.2}$ 分别为沥青在0.1、3.2 kPa应力水平下的应变恢复率。



(a) 70 °C, 0.1 kPa 应力水平下的应变恢复率



(b) 70 °C, 3.2 kPa 应力水平下的应变恢复率

图3 沥青在70 °C时应变恢复率

Fig. 3 Strain recovery rates of asphalt at 70 °C

从图3可知,随着老化程度的加深,沥青的应变恢复率在不断提高,这说明老化可以促使沥青的黏性成分向弹性转换,使沥青更多地表现出弹性性能。对于PAV0h、PAV5h、PAV10h、PAV15h、PAV20h沥青,掺入12%的再生剂后,在0.1 kPa应力水平下,其恢复率分别为原来的98.3%、94.4%、93.4%、98.5%、97.5%;在3.2 kPa应力水平下,其恢复率分别为原来的30.6%、27.9%、35.1%、45.6%、41.6%。

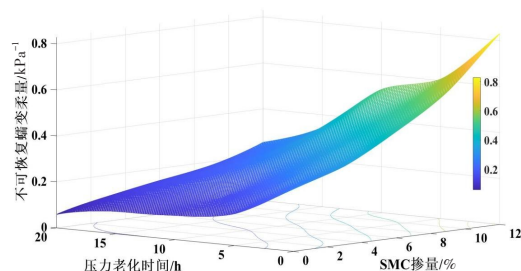
沥青的不可恢复蠕变柔量如图4所示,拟合方程如式(4)、(5)所示。

$$J_{nr0.1} = 0.2745 + 0.0342x - 0.0163y + 0.0011x^2 - 0.0016xy + 0.0004y^2 \quad (4)$$

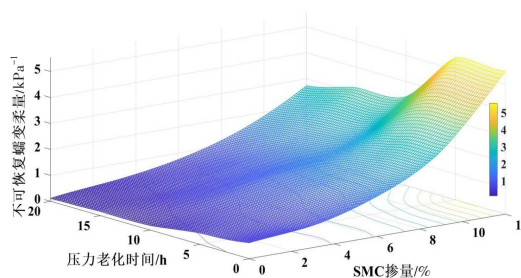
$$J_{nr3.2} = 0.6180 + 0.0673x - 0.0156y + 0.0280x^2 - 0.0103xy + 0.0006y^2 \quad (5)$$

式中: $J_{nr0.1}$ 和 $J_{nr3.2}$ 分别为沥青在0.1、3.2 kPa应力水平下不可恢复蠕变柔量。

从图4可知,沥青的不可恢复蠕变柔量随着其老化程度的加深在不断降低,随着再生剂的掺入逐渐增大。在0.1 kPa应力水平下,其不可恢复蠕变柔量始终处于相对较低的水平,在3.2 kPa应力水平下,对于PAV0h、PAV5h、PAV10h、PAV15h、PAV20h沥青,掺入12%的再生剂后,其不可恢复蠕变柔量分别为原来的8.89、12.32、18.75、19.09、24.89倍。这一方面说明在没有掺入再生剂时沥青的不可恢复蠕变柔量较低,另一方面说明了再生剂对沥青的高温性能有很大的影响。



(a) 0.1 kPa 应力水平



(b) 3.2 kPa 应力水平

图4 沥青在70 °C时不可恢复蠕变柔量

Fig. 4 Non-recoverable creep compliances of asphalt at 70 °C

2.1.3 BBR

1) 劲度模量。

-18 °C下的沥青劲度模量 S 如图5所示,拟合方程如式(6)所示。

$$S = 120.0000 - 23.0300x + 4.7750y + 1.4480x^2 - 0.5333xy + 0.0621y^2 \quad (6)$$

从图5可知,沥青的劲度模量随着其老化程度的加深有了明显的提高,这表明老化使沥青变得更脆,遇到应力时沥青更容易产生低温脆性破坏。

对于PAV0h、PAV20h沥青,加入12%的再生剂后,其劲度模量分别为原来的25.4%、14.8%,这表明再生剂改善了沥青的低温弯曲蠕变性能,对老化沥青的低温性能有很好的再生效果。

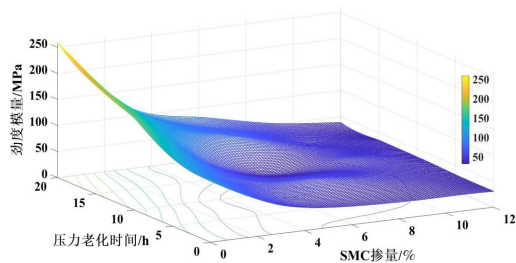


图5 -18 °C下的沥青劲度模量S
Fig. 5 Stiffness modulus S of asphalt at -18 °C

2) 蠕变速率。

-18 °C下的沥青蠕变速率 m 如图6所示,拟合方程如式(7)所示。

$$m = 0.2980 + 0.0167x - 0.0054y + 0.0002x^2 - 0.0001xy + 0.0001y^2 \quad (7)$$

式中: m 为蠕变速率。

从图6可知,沥青的蠕变速率随着其老化程度的加深有了明显下降,这表明老化使沥青的应力松弛

能力变差,更容易产生低温脆性破坏。再生剂的掺入使得沥青的蠕变速率有了不同程度的提高,对于PAV0h、PAV20h沥青,掺入12%的再生剂后,其蠕变速率分别变为原来的157.0%、263.4%。这表明再生剂的掺入改善了沥青的低温弯曲蠕变性能,使沥青在低温条件下具有较好的蠕变性能来抵抗应力作用。

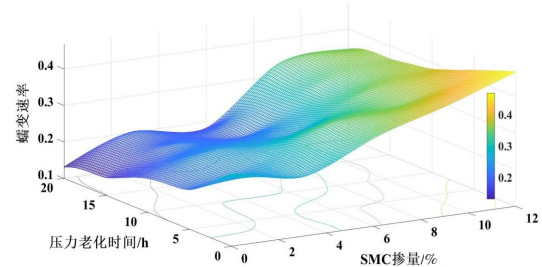


图6 -18 °C下的沥青蠕变速率 m
Fig. 6 Creep rate m of asphalt at -18 °C

2.2 再生剂最佳掺量分析

2.2.1 方差分析

为确定沥青流变性能指标拟合方程的可靠性,对其进行方差分析,结果如表3所示。由表3可知,各性能指标对应的确定系数(R -square)均大于0.95,这说明本研究建立的模型具有较好的可靠性。

表3 方差分析结果

Table 3 Results of variance analysis

指标	$G^*/\sin\delta$	$R_{0.1}$	$R_{3.2}$	$J_{nr0.1}$	$J_{nr3.2}$	S	m
残差平方和(SSE)	0.930 2	19.830 0	190.000 0	0.009 8	1.925 0	4 208.000 0	0.008 0
确定系数(R -square)	0.978 3	0.954 9	0.979 0	0.989 0	0.964 7	0.951 6	0.959 6
校正确定系数(adjusted R -square)	0.972 6	0.943 0	0.973 5	0.986 1	0.955 5	0.938 9	0.949 0
均方根差(RMSE)	0.221 0	1.022 0	3.162 0	0.023 0	0.318 0	14.880 0	0.021 0

2.2.2 再生剂最佳掺量确定

在0.1 kPa应力水平下,沥青的恢复率相对较高,不会产生较大的不可恢复蠕变柔量,因此采用3.2 kPa应力水平下沥青的恢复率和不可恢复蠕变柔量作为依据来确定再生剂的最佳掺量。由流变性能试验得到原样SBS沥青在70 °C下的 $G^*/\sin\delta$ 、 $R_{3.2}$ 、 $J_{nr3.2}$ 以及在-18 °C下的 S 、 m 分别为2.27、50.7、0.752、110、0.355,以SMC再生沥青的指标数值与原样SBS沥青的指标数值相等为条件,通过拟合方程求解即可获得不同老化程度的沥青对应的再生剂最佳掺量,相应指标下再生剂最佳质量掺量结果见表4。

对于 $G^*/\sin\delta$ 、 $R_{3.2}$ 、 $J_{nr3.2}$ 这三个高温性能指标,再

生剂会导致沥青的高温性能下降,为了保证沥青的高温性能,再生剂的掺量应小于 $J_{nr3.2}$ 对应的推荐掺量。对于 S 和 m 这两个低温性能指标,再生剂会使沥青的低温性能提升,为了提高沥青的低温性能,再生剂的掺量应大于 m 对应的推荐掺量。由此可得,PAV0h、PAV5h、PAV10h、PAV15h、PAV20h沥青的再生剂最佳掺量范围分别为1.558%~2.314%、3.034%~3.357%、4.259%~4.478%、5.232%~5.665%、5.947%~6.906%。

为了使SMC最佳掺量范围更具参考性,取再生剂最佳掺量范围的中值为最佳掺量,由此得到PAV0h、PAV5h、PAV10h、PAV15h、PAV20h沥青的再生剂最佳掺量,见表5。

表4 不同老化程度下与流变指标相对应的
SMC最佳掺量

Table 4 The optimum quality content of SMC under different aging degrees using rheological indexes %

不同老化程度沥青	不同指标对应下的SMC最佳掺量				
	$G^*/\sin \delta$	$R_{3.2}$	$J_{m3.2}$	S	m
PAV0h	3.029	2.844	2.314	1.152	1.558
PAV5h	4.025	4.722	3.357	2.226	3.034
PAV10h	5.394	6.278	4.478	3.339	4.259
PAV15h	7.354	7.504	5.665	4.494	5.232
PAV20h	11.091	8.399	6.906	5.695	5.947

表5 不同老化程度下SBS改性沥青对应的SMC最佳掺量

Table 5 The optimal quality content of SMC corresponding to SBS modified asphalt under different aging degrees %

不同老化程度沥青	SMC最佳掺量
PAV0h	1.936
PAV5h	3.196
PAV10h	4.369
PAV15h	5.449
PAV20h	6.427

2.3 微观特性分析

2.3.1 红外光谱

对原样未老化SBS沥青、PAV0h、PAV10h和PAV20h沥青、SMC再生剂、再生沥青进行红外光谱试验,再生沥青的再生剂掺量选择上文中的最佳掺量。红外光谱试验结果如图7、图8所示。

键合指数 $I_{S=O}$ 、 $I_{C=C}$ 常用来评价沥青的氧化硬化或老化程度。故根据公式(8)、(9)计算了图7、图8中SBS沥青、老化沥青与再生沥青的亚砷($S=O$)、芳香族($C=C$)的键合指数。

$$I_{S=O} = \frac{1030 \text{ cm}^{-1} \text{附近亚砷带面积}}{600 \text{ cm}^{-1} \text{和} 2000 \text{ cm}^{-1} \text{之间光谱带面积}} \quad (8)$$

$$I_{C=C} = \frac{1600 \text{ cm}^{-1} \text{附近芳香带面积}}{600 \text{ cm}^{-1} \text{和} 2000 \text{ cm}^{-1} \text{之间光谱带面积}} \quad (9)$$

式中: $I_{S=O}$ 、 $I_{C=C}$ 分别为亚砷($S=O$)、芳香族($C=C$)的键合指数。

SBS沥青、PAV0h、PAV10h和PAV20h沥青的亚砷($S=O$)指数分别为0.007、0.024、0.029、0.032,芳香族($C=C$)指数分别为0.020、0.054、0.064、0.078。可以发现,沥青老化后的键合指数 $I_{S=O}$ 和 $I_{C=C}$ 均有明显提高。当加入再生剂后,PAV0h、PAV10h、PAV20h再生沥青的键合指数 $I_{S=O}$ 分别为0.013、0.013、0.012,键合指数 $I_{C=C}$ 分别

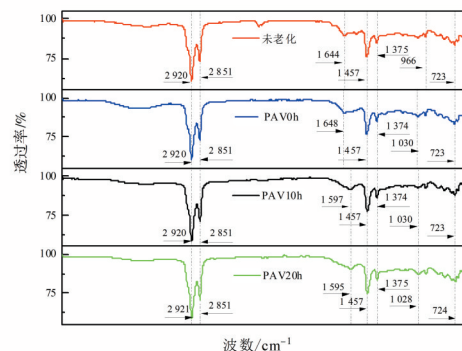
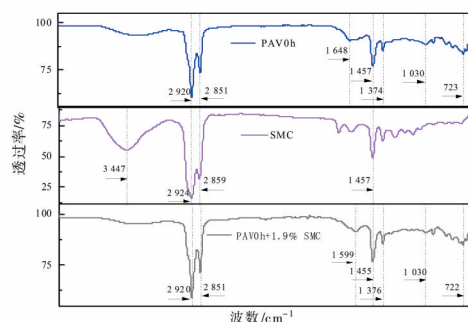
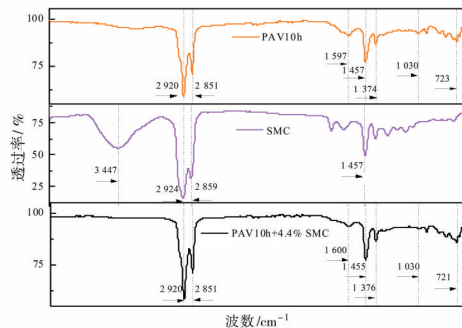


图7 不同老化程度SBS沥青红外光谱

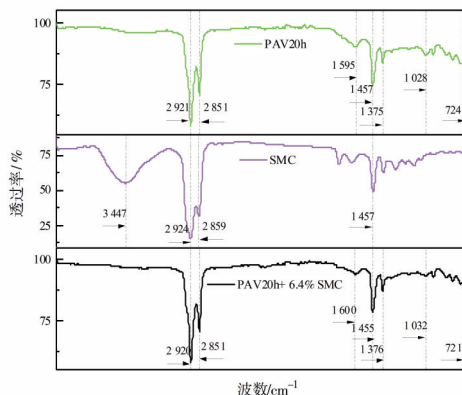
Fig. 7 Infrared spectrum of SBS asphalt with different aging degrees



(a) PAV0h



(b) PAV10h



(c) PAV20h

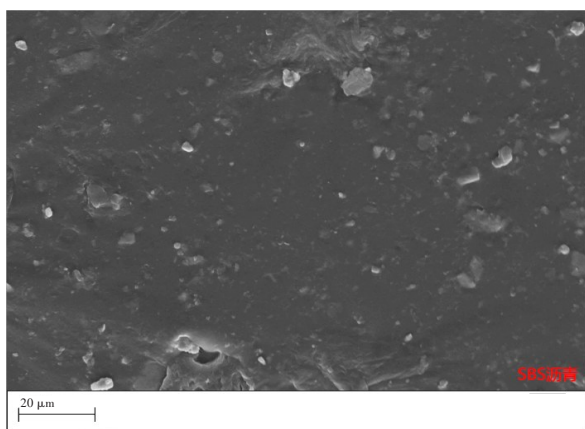
图8 老化沥青及SMC再生沥青红外光谱

Fig. 8 Infrared spectrum of aging asphalt and SMC reclaimed asphalt

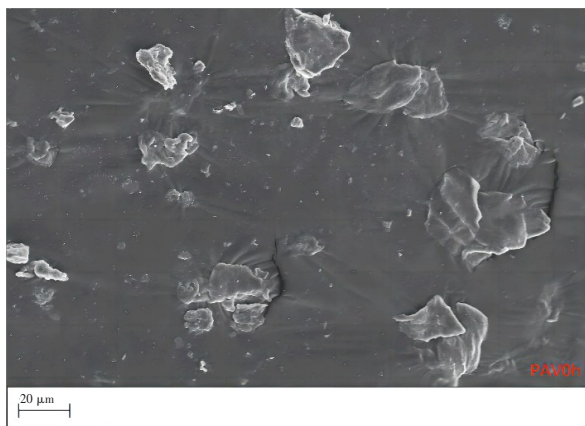
为0.023、0.026、0.037,加入再生剂之后键合指数 $I_{S=O}$ 和 $I_{C=C}$ 都有明显的下降,这说明再生剂对老化沥青有较好的恢复作用。图7中没有新的官能团产生,SMC再生剂没有与沥青发生化学反应,两者仅为物理共混。

2.3.2 电镜扫描

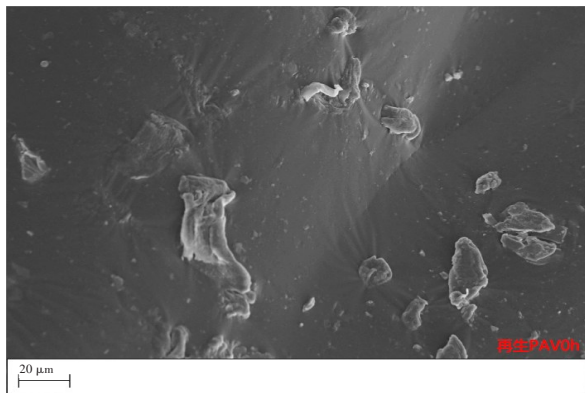
对原样SBS沥青、PAV0h、PAV10h和PAV20h沥青、再生沥青进行电镜扫描试验。再生沥青的再生剂掺量选择上文中的最佳掺量,显微镜放大倍数是500倍,电镜扫描试验结果如图9所示。



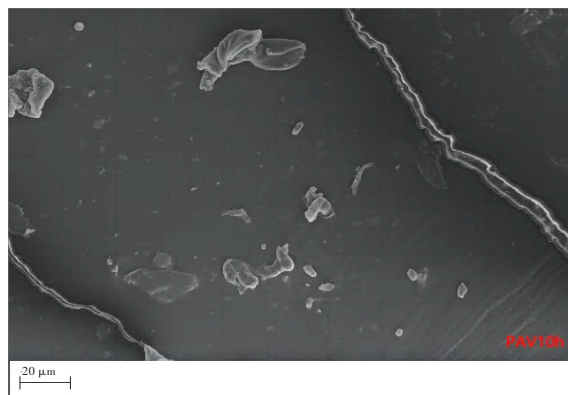
(a) SBS沥青



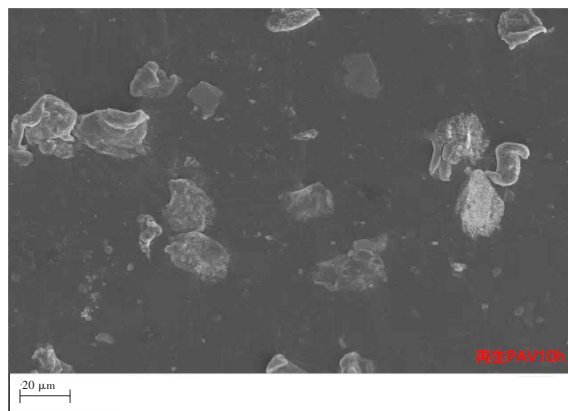
(b) PAV0h



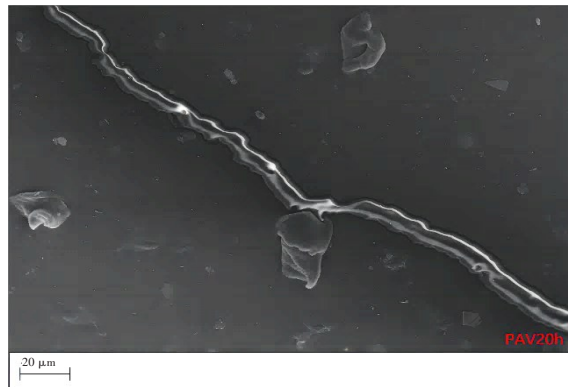
(c) 再生 PAV0h



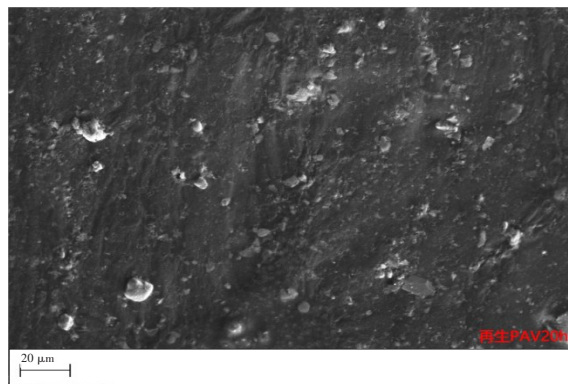
(d) PAV10h



(e) 再生 PAV10h



(f) PAV20h



(g) 再生 PAV20h

图9 沥青电镜扫描结果

Fig. 9 SEM results of asphalt

从图9可知,SBS改性剂在沥青中呈现出颗粒状,沥青的表面相对较为光滑,在SBS改性剂周围存在一定的褶皱。在短期老化后,沥青表面褶皱明显增多,根据已有研究,这可能是因为老化使SBS沥青的轻组分减少,沥青质比例增加,有相当数量的芳香度高的胶质形成胶团,此时沥青属于凝胶型结构^[20]。

在10 h长期老化后,沥青出现了一定的裂缝,这表明SBS沥青中的轻组分已损失一定程度,且沥青表现出了明显的脆性,在20 h长期老化后裂缝明显增大。当再生剂掺入后,短期老化沥青的褶皱有了明显的减少,这说明再生剂在一定程度上改善了沥青轻组分损失带来的影响。对于长期老化沥青,再生剂的掺入使得沥青的裂缝完全消失,并且表面有一定的褶皱,这说明沥青的结构得到了较好的修复。

3 讨论

为了探究新型温拌再生剂SMC对老化SBS改性沥青的再生效果和再生机理,促进SMC温拌再生剂的发展,本文对SMC再生剂再生不同老化程度SBS改性沥青的高低温流变性能及微观特性进行了研究。利用室内模拟老化试验制备了不同老化程度的SBS改性沥青,再将不同掺量的SMC再生剂掺入老化沥青中,通过动态剪切试验以及低温弯曲蠕变试验分析SMC再生剂的再生效果,建立SMC再生剂掺量、老化沥青老化程度以及流变性能指标三者之间的联系,揭示了SMC再生不同老化程度SBS改性沥青前后的流变性能变化规律。

老化会使沥青变硬、变脆,会降低沥青的低温性能。随着沥青老化程度的加深,其车辙因子、应变恢复率、劲度模量会逐渐增大,不可恢复蠕变柔量和蠕变速率会逐渐减小。随着SMC再生剂掺量的提高,沥青车辙因子、应变恢复率、劲度模量会逐渐减小,不可恢复蠕变柔量和蠕变速率会逐渐增大。

以SMC再生沥青的流变指标数值与原样SBS沥青的指标数值相等为条件,通过拟合方程求解即可获得不同流变性能指标下SMC再生剂的最佳掺量,从而得到不同老化程度SBS改性沥青对应的SMC再生剂最佳掺量。

通过红外光谱试验发现SMC再生剂与老化SBS沥青并没有发生化学反应,两者仅为物理共混,随着沥青老化程度的加深,亚砷指数和芳香族指数会逐渐增高,SMC再生剂的掺入能够使亚砷指数和芳香族指数恢复到原样SBS沥青的水平。老化会使沥青表面的褶皱增多,产生微裂缝,SMC再生剂的掺入能够减少沥青表面的褶皱,消除老化带来的开裂,弥补沥青的结构缺陷。

本文揭示了SMC再生剂对老化SBS沥青的再生效果和再生机理,促进了SMC再生剂在道路工程的发展应用,可以为SBS沥青的再生利用提供参考。但SMC再生不同老化程度SBS沥青的疲劳性能有待研究,在微观特性方面需要借助更加精密的仪器深入研究老化SBS沥青及SMC再生沥青的微观形态和机理,再生混合料性能须进一步验证。

4 结论

为全面评价SMC再生剂对不同老化程度SBS沥青的再生效果,分析SMC再生剂的再生机理,通过对原样SBS沥青、老化SBS沥青及SMC再生沥青的高低温流变性能研究和微观特性对比研究,得到如下主要结论:

1) 老化会使沥青变硬、变脆,SMC再生剂的掺入会降低老化沥青的车辙因子,降低老化沥青的应变恢复率,提高老化沥青的不可恢复蠕变柔量,但在低应力水平下对其恢复率影响很小。

2) 老化会使SBS沥青的低温性能变差,SMC再生剂能够改善其低温性能,甚至随着SMC掺量的增大,再生沥青的低温性能比原样SBS沥青的更优。基于流变性能得到PAV0h、PAV5h、PAV10h、PAV15h、PAV20h沥青的SMC再生剂最佳掺量分别为1.936%、3.196%、4.369%、5.449%、6.427%。

3) SMC再生剂与老化SBS沥青并没有发生化学反应,两者仅为物理共混。老化会使沥青的亚砷(S=O)指数和芳香族(C=C)指数增高,SMC再生剂会使亚砷(S=O)指数和芳香族(C=C)指数明显下降。同时,老化会使沥青产生微裂缝,再生剂能够消除老化带来的开裂,弥补沥青的结构缺陷。

[参考文献]

- [1] 李恒,叶群山,羊治宇,等.OMMT/ZnO复合改性沥青抗老化性能研究及机理分析[J].交通科技与经济,2021,23(2):35-41.DOI:10.19348/j.cnki.issn1008-5696.2021.02.006.
- LI Heng, YE Qunshan, YANG Zhiyu, et al. On the aging resistance and mechanism analysis of OMMT/ZnO composite modified asphalt[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2021, 23(2): 35-41. DOI: 10.19348/j.cnki.issn1008-5696.2021.02.006.
- [2] 冯新军,解明卫.再生聚苯乙烯掺配改性剂对沥青混合料性能的影响分析[J].中外公路,2020,40(4):234-239.DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.04.050.
- FENG Xinjun, XIE Mingwei. Analysis on the influence of recycled polystyrene mixed with modifier on the performance of asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(4): 234-239. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2020.04.050.
- [3] 杨三强,饶奇,史向英.不同老化程度下沥青流变力学性能[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2019,16(1):22-27. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.01.004.
- YANG Sanqiang, RAO Qi, SHI Xiangying. Rheological mechanical properties of asphalt under different aging levels[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2019, 16(1): 22-27. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.01.004.
- [4] 王争愿,李九苏,娄梦雷,等.RAP质量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. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.04.005.
- WANG Zhengyuan, LI Jiusu, LOU Menglei, et al. Effect of RAP contents on performance of reactive cold mix recycled asphalt mixture [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2019, 16(4): 35-41. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.04.005.
- [5] 田小革,卢雪蓉,窦文利,等.再生沥青调和理论的适用性研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(1):20-26. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.003.
- TIAN Xiaoge, LU Xuerong, DOU Wenli, et al. Research on the practicability of blending theory of recycled asphalt[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(1): 20-26. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.003.
- [6] 冯哲,李亚非,王书杰.SMC常温再生沥青混合料配合比设计方法及性能验证[J].公路交通科技(应用技术版),2018,14(6):44-45. DOI: CNKI: SUN: GLJJ.0.2018-06-020.
- FENG Zhe, LI Yafei, WANG Shujie. SMC normal temperature recycled asphalt mixture mix proportion design method and performance verification [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Applied Technology Edition), 2018, 14(6): 44-45. DOI: CNKI: SUN: GLJJ.0.2018-06-020.
- [7] ZHANG J Z, ZHANG X M, LIANG M, et al. Influence of different rejuvenating agents on rheological behavior and dynamic response of recycled asphalt mixtures incorporating 60% RAP dosage [J]. Construction and Building Materials, 2020, 238: 117778. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117778.
- [8] YANG C, ZHANG J W, YANG F, et al. Multi-scale performance evaluation and correlation analysis of blended asphalt and recycled asphalt mixtures incorporating high RAP content [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 317: 128278. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128278.
- [9] 李九苏,王平,王争愿,等.十溴二苯乙烷阻燃反应型常温沥青的研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(2):26-32. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.02.005.
- LI Jiusu, WANG Ping, WANG Zhengyuan, et al. Research on reactive cold mixed flame retardant asphalt modified by decabromodiphenylethane [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(2): 26-32. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.02.005.
- [10] 何东坡,于泽旭.SBS和SBR改性沥青对温再生沥青混合料性能的影响[J].化工新型材料,2020,48(8):254-257,262. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2020.08.055.
- HE Dongpo, YU Zexu. Influencing factor of fatigue performance of warm mix recycled asphalt mixture [J]. New Chemical Materials, 2020, 48(8): 254-257, 262. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2020.08.055.
- [11] 朱小刚.高RAP质量掺量沥青路面温拌再生混合料特征及路用性能研究[J].交通科技,2020(1):119-122. DOI: 10.3963/j.issn.1671-7570.2020.01.026.
- ZHU Xiaogang. Study on characteristics and road performance of warm mixed recycled asphalt pavement mixture with high RAP content [J]. Transportation Science & Technology, 2020(1): 119-122. DOI: 10.3963/j.issn.1671-7570.2020.01.026.
- [12] AI C F, LI Q J, QIU Y J. Testing and assessing the performance of a new warm mix asphalt with SMC [J].

- Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2015, 2(6): 399-405. DOI: 10.1016/j.jtte.2015.10.002.
- [13] 欧阳铖霏.SMC常温改性沥青及沥青混合料综合性能试验评价[D].成都:西南交通大学,2020.DOI: 10.27414/d.cnki.gxnju.2020.001264.
- OUYANG Chengfei. Experimental evaluation of comprehensive performance of SMC modified asphalt and asphalt mixture at room temperature[D].Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020. DOI: 10.27414/d.cnki.gxnju.2020.001264.
- [14] 田苗苗,李亚非,罗代松,等.50%RAP的SMC再生改性沥青混合料疲劳性能研究[J].公路交通科技(应用技术版),2020,16(2):59-61. DOI: CNKI: SUN: GLJJ.0.2020-02-022.
- TIAN Miaomiao, LI Yafei, LUO Daisong, et al. Research on fatigue performance of SMC regenerated modified asphalt mixture with 50% RAP[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development (Applied Technology Edition), 2020, 16(2): 59-61. DOI:CNKI:SUN:GLJJ.0.2020-02-022.
- [15] 罗浩原,栗振坤,郑鹏飞,等.SMC常温改性剂路用性能、机理及环保效益分析[J].建筑材料学报,2020,23(5):1144-1152. DOI: 10.3969/j. issn. 1007-9629.2020. 05.021.
- LUO Haoyuan, LI Zhenkun, ZHENG Pengfei, et al. Analysis of road performance, mechanism and environmental benefits of SMC normal temperature modifier[J].Journal of Building Materials, 2020, 23(5): 1144-1152. DOI: 10.3969/j. issn. 1007-9629.2020. 05. 021.
- [16] 谢朝阳.高RAP质量掺量SMC常温再生沥青混合料性能研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- XIE Zhaoyang. Research on properties of recycled asphalt mixture with high RAP content and SMC at room temperature [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [17] 黄劲.SMC常温改性沥青的应用技术研究[J].公路交通科技(应用技术版),2016,12(5):125-127.
- HUANG Jin. Study on application technology of SMC SMC modified asphalt at room temperature [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Applied Technology Edition), 2016, 12(5): 125-127.
- [18] 闫瑾,陈景,罗代松,等.不同质量掺量SMC再生沥青混合料的路用性能研究[J].公路交通科技(应用技术版),2020,16(2):62-65. DOI: CNKI: SUN: GLJJ.0.2020-02-023.
- YAN Jin, CHEN Jing, LUO Daisong, et al. Research on road performance of different content SMC recycled asphalt mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Applied Technology Edition), 2020, 16(2): 62-65. DOI:CNKI: SUN:GLJJ.0.2020-02-023.
- [19] 梁清丽.高RAP质量掺量SMC常温改性再生沥青混合料性能研究[J].西部交通科技,2020(5):10-13. DOI: 10.13282/j.cnki.wccst.2020.5.003.
- LIANG Qingli. Study on properties of recycled asphalt mixture modified by SMC with high RAP content at room temperature [J]. Western China Communication Science & Technology, 2020(5): 10-13. DOI: 10.13282/j.cnki.wccst.2020.5.003.
- [20] 丁磊.不同老化方式对沥青性能的影响及老化机理研究[D].长沙:长沙理工大学,2020. DOI: 10.26985/d.cnki.gcsjc.2020.000324.
- DING Lei. Influence of different aging methods on asphalt properties and aging mechanism [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2020. DOI: 10.26985/d.cnki.gcsjc.2020.000324.

(责任编辑:赵冰;校对:刘平;英文编辑:李岳林)