文章编号:1674-2869(2025)06-0677-06

温拌反应再生SBS改性沥青流变性能评价

黄小梅[1,2],汪文萱[1,2],李方华[1,2],沈炜力[1,2],徐 雄*[1,2]
1. 武汉工程大学土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430074;
2. 绿色土木工程材料与结构湖北省工程研究中心,湖北 武汉 430074

摘 要:废旧苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)改性沥青混合料的大量堆积会造成严重的环境污染和资源浪费。本研究采用聚氨酯(PU)预聚体与1,4-丁二醇二缩水甘油醚(BUDGE)作为反应性有机物,利用Sasobit温拌剂,对老化SBS改性沥青进行温拌反应再生。通过动态剪切流变仪进行频率扫描和温度扫描试验,研究温拌反应再生对老化SBS改性沥青流变性能的影响,评价其再生效果。结果表明:Sasobit会使反应再生SBS改性沥青弹性成分增加,黏性成分减少,且Sasobit掺量的增加可以改善反应再生SBS改性沥青的抗变形能力,而抗疲劳开裂性能则反之;当温拌反应再生SBS改性沥青的车辙因子($G^*/\sin\delta$)为1 kPa时,对应的临界温度均为85 ℃,高温性能等级(PG)为PG82,说明温拌反应再生SBS改性沥青能保持较高的高温抗变形能力。

关键词:苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物;改性沥青;老化;温拌反应再生;流变性能
中图分类号:U414 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202405006

Evaluation of rheological properties of warm-mix reaction-rejuvenated SBS-modified asphalt

HUANG Xiaomei[1,2], *WANG Wenxuan*[1,2], *LI Fanghua*[1,2], *SHEN Weili*[1,2], *XU Xiong*[*1,2]
1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. Hubei Provincial Engineering Research Center for Green Civil Engineering Materials and Structures, Wuhan 430074, China

Abstract: The disposal of large quantities of waste styrene-butadiene-styrene block copolymer (SBS)-modified asphalt mixtures leads to serious environmental pollution and resource wastage. In this study, a polyurethane (PU) prepolymer and 1, 4-butanediol diglycidyl ether (BUDGE) were used as reactive rejuvenators, combined with Sasobit warm-mix additive, to rejuvenate aged SBS-modified asphalt through a warm-mix reaction process. Frequency sweep and temperature sweep tests were conducted using a dynamic shear rheometer to investigate the effect of warm-mix reaction-rejuvenation on the rheological properties of the aged SBS-modified asphalt and to evaluate the rejuvenation effectiveness. The results showed that the Sasobit increases the elastic component and reduces the viscous component of rejuvenated SBS-modified asphalt. An increase in Sasobit content improved the deformation resistance of the rejuvenated asphalt, but reduced its resistance to fatigue cracking. When the rutting factor ($G^*/\sin\delta$) of the warm-mix reaction-rejuvenated SBS-modified asphalt reached 1 kPa, the corresponding critical temperature was 85 ℃, and the high-temperature performance grade (PG) was PG82, indicating that the warm-mix reaction-rejuvenated SBS-modified asphalt retains high deformation resistance at elevated temperatures.

Keywords: styrene-butadiene-styrene block copolymer; modified asphalt; aging; warm-mix reaction-rejuvenation; rheological properties

收稿日期:2024-05-10
基金项目:湖北省自然科学基金(2023AFB245);武汉工程大学第十六届研究生教育创新基金(CX2024531);安徽省住房城乡建设科学技术计划项目(2023-YF081);湖北省建设科技计划项目(2023177)
作者简介:黄小梅,硕士研究生。Email:22304010071@stu.wit.edu.cn
***通信作者**:徐 雄,博士,副教授。Email:xxucea@wit.edu.cn
引文格式:黄小梅,汪文萱,李方华,等. 温拌反应再生SBS改性沥青流变性能评价[J]. 武汉工程大学学报,2025,47(6):677-682.

苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(styrene-butadiene-styrene block copolymer,SBS)改性沥青混合料具有优良的高低温性能和黏结性,广泛应用于高等级公路建设[1-3]。但是,随着服役时间延长,SBS改性沥青不可避免地发生老化,导致其所筑路面整体性能劣化,并出现坑槽、裂缝等病害,需进行铣刨、重筑等处理,从而产生大量废旧SBS改性沥青混合料[4-6]。这些混合料通常采用填埋、堆放等方式处理,既污染环境又浪费资源[7-8]。因此,废旧SBS改性沥青混合料资源化再生利用是道路领域亟需解决的重要工程问题。

SBS改性沥青在老化过程中基质沥青发生氧化缩聚,同时SBS分子结构断裂,从而导致整体性能显著下降[9-10]。研究表明,普通沥青再生剂可有效恢复老化SBS改性沥青中基质沥青的性能,但无法修复降解的SBS改性剂分子结构[11-13]。近年来,相关研究人员尝试将反应性有机化合物作为老化SBS改性沥青再生剂的组成部分进行热拌反应再生,发现热拌反应再生SBS改性沥青的整体性能得到明显改善。例如,Xu等[14]制备了一种以环氧类化合物为主的反应性再生剂,与传统再生剂相比,该反应性再生剂不仅具有重筑SBS氧化降解产物分子结构的能力,而且还能平衡沥青化学组分,从而显著提高热拌反应再生SBS改性沥青的物理和流变性能。然而,与热拌普通沥青混合料相比,热拌再生沥青混合料的拌和温度与压实温度一般高5~15 ℃,期间仍会产生二氧化硫、一氧化碳等大量有害气体,这不仅会对作业人员的身体健康造成潜在风险,而且会对生态环境造成巨大污染[15]。

温拌再生技术是一种清洁生产技术,其既可降低沥青混合料的拌和与压实温度,又可使再生沥青混合料的综合性能恢复到可应用水平[16-17]。例如,Wang等[18]采用自制的新型温拌再生剂(warm-mix rejuvenator,WR)对老化沥青进行再生,发现WR不仅具有降低老化沥青混合料拌和与压实温度的能力,还能有效提升老化沥青的物理性能,并延长其疲劳寿命。但这类低黏性普通温拌再生剂同样存在无法化学修复SBS降解产物的分子结构而实现改性剂性能的恢复,致使温拌再生SBS改性沥青物理、流变性能达不到较高的应用要求。因此,开发一种SBS改性沥青温拌反应再生技术具有显著工程价值。

本研究采用聚氨酯(polyurethane,PU)预聚体和1,4-丁二醇二甘油酯醚(1,4-butanediol diglycidyl ether,BUDGE)作为沥青反应再生剂,协同使用Sasobit温拌剂对老化SBS改性沥青进行温拌反应再生。通过动态剪切流变(dynamic shear rheometer,DSR)测试,研究频率和温度分别对温拌反应再生SBS改性沥青流变性能的影响,评价温拌反应再生的技术效果。

1 实验部分

1.1 原材料

1.1.1 沥青 本研究选用的沥青是I-D类SBS改性沥青,由武汉汉阳市政公司提供。SBS改性沥青的软化点为60.4 ℃,25 ℃针入度为48(0.1mm),5 ℃延度为41.5 cm,均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)规范要求。

1.1.2 反应再生剂 本研究选择PU预聚体和BUDGE作为反应再生剂。PU预聚体由巴斯夫聚氨酯特种产品(中国)有限公司提供,其密度和沸点分别为1.22 g/cm^{3}和330 ℃。该物质是一种含有异氰酸酯基团(—NCO)的单组分聚氨酯,可与—OH、—COOH等活性基团反应。BUDGE含有环氧柔性结构,在一定条件下可与含有—OH和—COOH基团的物质反应,密度为1.1 g/cm^3,沸点为266 ℃,环氧值为0.771 g/mol。PU预聚体主要用于修复老化SBS改性沥青中SBS降解产物的分子结构,旨在减少再生后高温性能的损失,同时利用BUDGE作为反应性低温性能增强剂,降低再生沥青的低温抗裂性损失风险。

1.1.3 温拌剂 本研究采用的温拌剂Sasobit是一种石蜡有机添加剂,购于苏州路必思科技有限公司。外观为粉末状,密度为0.9 g/cm^3,熔点约为100 ℃。当温度超过Sasobit的熔点时,其可以完全溶解在沥青中,有效减小沥青在较低温度下的黏度,有助于降低沥青混合料拌和与摊铺温度。

1.2 老化SBS改性沥青的制备

在160~170 ℃条件下,加热SBS改性沥青至熔融状态后称取(50.0±0.5) g倒入标准老化盘中,并将其放入163 ℃烘箱中热氧老化48 h,制备老化SBS改性沥青。SBS改性沥青老化前后的物理性能如表1所示,经热氧老化后,SBS改性沥青的25 ℃针入度由48(0.1mm)降至26(0.1mm),5 ℃延度由41.5 cm降至1.1 cm,说明SBS改性沥青发生了严重老化。因此,将该老化条件下获得的老化SBS改性沥青作为本研究中温拌反应再生的研究对象。为方便表述,将老化前后的SBS改性沥青分别记为SBSMA和aSBSMA。

表1　SBS改性沥青老化前后物理性能

Table 1　Physical properties of SBSMA and aSBSMA

性能指标	SBSMA	aSBSMA	测试标准
25 ℃针入度 /（0.1mm）	48	26	T0604
软化点 / ℃	60.4	70.3	T0605
5 ℃延度 / cm	41.5	1.1	T0606

1.3　温拌反应再生SBS改性沥青的制备

根据本课题组前期研究[19]，确定热拌反应再生SBS改性沥青中反应再生剂PU和BUDGE的最佳用量分别为1%和4%（以aSBSMA质量计）。以此为基础，本研究制备温拌反应再生SBS改性沥青时采用以下步骤：首先，将aSBSMA在145 ℃加热至熔融状态；然后，在500 r/min的搅拌速率和145 ℃的加工温度下，依次加入计量PU和BUDGE，搅拌5 min，制备反应再生SBS改性沥青，记为RSBSMA；最后，分别向RSBSMA中加入1%、2%、3%（以aSBSMA质量计）的Sasobit温拌剂，继续搅拌5 min，得到温拌反应再生SBS改性沥青，分别记为1S/RSBSMA、2S/RSBSMA、3S/RSBSMA。

1.4　试验方案

1.4.1　*DSR频率扫描试验*　分别使用直径为8 mm（测试温度≤28 ℃）和25 mm（测试温度>28 ℃）的平行板对沥青样品进行DSR频率扫描测试，平行板间距为1 mm，加载频率控制为0.628~628 rad/s。

通过获得的频率扫描试验数据，采用Christensen-Anderson模型构建复数模量（G^*）主曲线和相位角（δ）主曲线，用以表征温拌反应再生SBS改性沥青的频率依赖变形行为[20]。主曲线模型构建方程见式（1）-式（4）。模型参数通过非线性最小二乘法进行拟合，以最小化G^*和δ的计算值与试验值之间的总体误差。

$$\log_a(t)=\frac{-C_1(t-t_r)}{C_2+t-t_r} \tag{1}$$

$$\omega_r=\omega\times 10^{\log_a(t)} \tag{2}$$

$$G^*=G_g\times\left[1+\left(\frac{\omega_r}{\omega_c}\right)^{\frac{\lg 2}{R}}\right]^{-\frac{R}{\lg 2}} \tag{3}$$

$$\delta=\frac{90}{\left[1+\left(\frac{\omega_r}{\omega_c}\right)^{\frac{\lg 2}{R}}\right]} \tag{4}$$

式中：t为测试温度，℃；t_r为参考温度，℃；C_1和C_2为拟合参数；ω为试验频率，rad/s；ω_r为折算频率，rad/s；G_g为玻璃模量，假设等于1 GPa；ω_c为交叉频率，rad/s；R为流变指标。

1.4.2　*DSR温度扫描试验*　同样采用平行板模式对沥青样品进行DSR温度扫描测试，通过G^*和δ表征温拌反应再生SBS改性沥青的温度依赖性。试验条件为：应变控制为10%，温度范围为4~76 ℃，升温速率为2 ℃/min。

1.4.3　*高温性能试验*　车辙因子（$G^*/\sin\delta$）是表征沥青在高温条件下抵抗永久变形能力的重要指标。根据AASHTO M 320-10规范，本研究将DSR温度扫描试验获得的G^*和δ进行$G^*/\sin\delta$计算，将其达到1 kPa时的温度作为沥青样品的临界车辙温度，以此划分高温性能等级（performance grade，PG）。临界车辙温度越高，沥青的高温抗永久变形能力越高。

1.4.4　*抗疲劳性能试验*　疲劳因子（$G^*\cdot\sin\delta$）是表征沥青在中高温条件下抵抗外部荷载反复作用而引发开裂能力的关键指标。根据AASHTO M 320-10规范，本研究将$G^*\cdot\sin\delta$达到5 000 kPa时的温度作为沥青样品的临界疲劳温度，其值越小，沥青的抗疲劳性能就越好。

2　结果与讨论

2.1　温拌反应再生SBS改性沥青的频率依赖性

图1为参考温度在20 ℃时，温拌反应再生SBS改性沥青的G^*和δ主曲线。从图1中可以看出，随着频率增加，新鲜、老化和温拌反应再生SBS改性沥青的G^*和δ分别呈现正相关和负相关的线性关系。在相同频率下，aSBSMA的G^*和δ分别高于和低于SBSMA，说明长期热氧老化增强了SBSMA的抗变形能力。随着Sasobit掺量增加，温拌反应再生SBS改性沥青的G^*和δ分别呈现逐渐略微增大和小幅减小的趋势，表明其弹性成分相对增加，黏性成分相对减少，有助于提升其抗变形性。

2.2　温拌反应再生SBS改性沥青的温度依赖性

图2为温拌反应再生SBS改性沥青G^*和δ的温度依赖性。从图2中可以看出，随着温度升高，与SBSMA对比，aSBSMA的G^*增加，δ降低。这说明热氧老化会使SBSMA中轻组分挥发，导致沥青的脆性和硬度增加，从而提高了其抵抗高温变形的能力，温度敏感性和流动性降低。在相同测试温度下，随着Sasobit掺量从1%增加至3%，温拌反应再生SBS改性沥青的G^*和δ分别表现出持续增长和小幅下降的趋势。这表明，Sasobit掺量的增加有助于提升沥青的抗剪切变形能力，但会降低其黏性流动能力。这是因为Sasobit在未熔化时

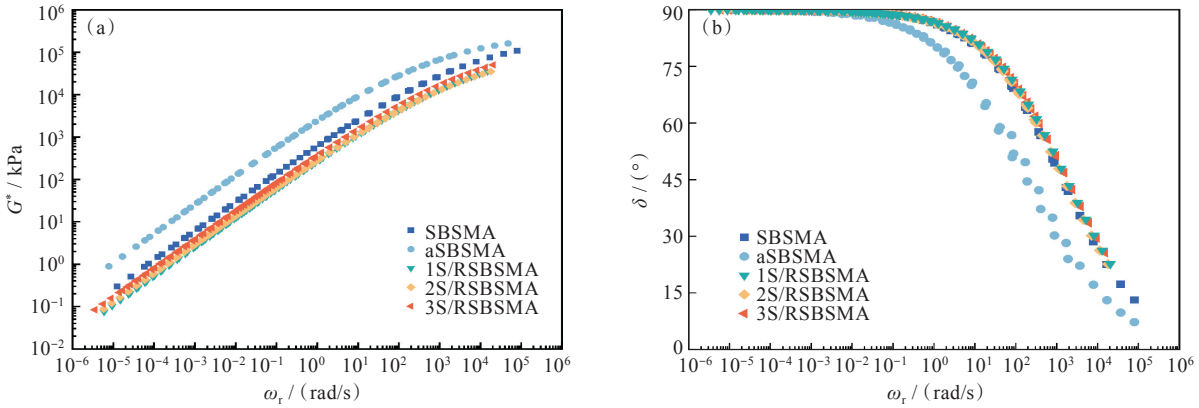

图1 温拌反应再生SBS改性沥青的频率依赖性:(a)G^*,(b)δ

Fig. 1 Frequency dependence of warm-mix reaction-rejuvenated SBS modified asphalt :(a)G^*,(b)δ

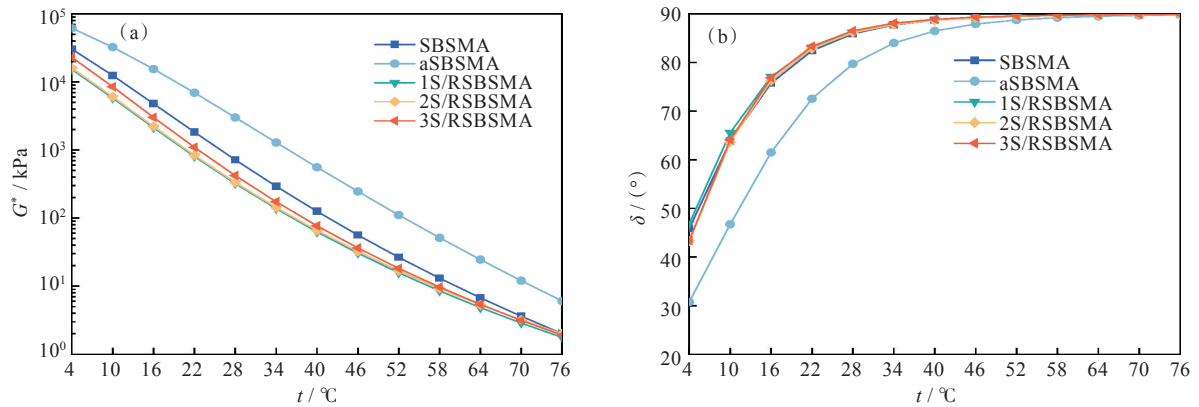

图2 温拌反应再生SBS改性沥青的温度依赖性:(a)G^*,(b)δ

Fig. 2 Temperature dependence of warm-mix reaction-rejuvenated SBS modified asphalt:(a) G^*,(b) δ

呈蜡状固体结构,且以细小晶体的形式分布在沥青中。这些晶体通过物理交联作用,限制了沥青分子在高温下的自由移动,进而减少了分子间的流动性。

2.3 高温性能

图3为温拌反应再生SBS改性沥青的$G^*/\sin\delta$。从图3中可以看到,随着温度升高,与SBSMA相比,aSBSMA的$G^*/\sin\delta$增大。这说明热氧长期老化可以改善沥青的高温抗变形能力,使其具有良好的高温抗车辙性能。随着Sasobit从1%增加到3%,温拌反应再生SBS改性沥青的$G^*/\sin\delta$在28~76 ℃时呈现小幅度上升的趋势。结果表明,增加Sasobit掺量能提高RSBSMA的抗车辙变形性能。这是因为Sasobit的熔点约为100 ℃,而试验温度低于其熔点,Sasobit呈现出石蜡的网格状晶体结构,这种晶体结构能够限制沥青分子在高温下的移动,从而提高了沥青的高温抗变形能力[21]。

当$G^*/\sin\delta$为1 kPa时,根据$G^*/\sin\delta$随温度变化的依赖关系规律,对曲线进行外推分析,发现新鲜和温拌反应再生的SBS改性沥青对应的临界车辙温度均为85 ℃,高温PG等级确定为PG82。这表明温拌反应再生SBS改性沥青能保持较高的高温抗变形能力。

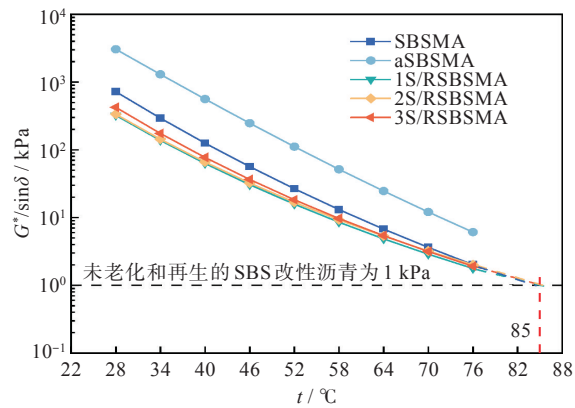

图3 温拌反应再生对老化SBS改性沥青$G^*/\sin\delta$的影响

Fig. 3 Effect of warm-mix reaction-rejuvenated on $G^*/\sin\delta$ of aged SBS modified asphalt

2.4 抗疲劳性能

图4为温拌反应再生SBS改性沥青的$G^*\cdot\sin\delta$。从图4中可以看出,aSBSMA的$G^*\cdot\sin\delta$远高于SBSMA,说明长期热氧老化会降低SBSMA的抗疲劳开裂能力。从4 ℃到40 ℃时,随

着Sasobit的掺量从1%增加至3%，温拌反应再生SBS改性沥青的$G^*\cdot\sin\delta$逐渐增大。在一定温度下，温拌反应再生SBS改性沥青的$G^*\cdot\sin\delta$均高于SBSMA。结果表明，提高Sasobit掺量会略微降低RSBSMA抗疲劳性能，但温拌反应再生SBS改性沥青仍然保持优异的抗疲劳开裂性能。

SBSMA老化前后的临界疲劳温度分别为15.7和23.9 ℃，说明长期热氧老化后，SBSMA在较高温度下更容易发生疲劳破坏。随着Sasobit掺量由1%增加至3%，温拌反应再生SBS改性沥青的疲劳临界温度从18.9 ℃升高至20.5 ℃，说明在较低温度下提高Sasobit的掺量，会略微降低RSBSMA的疲劳抗裂性。这是因为Sasobit的蜡组分在低温下形成固体晶体结构，限制了沥青分子的自由流动，使沥青在低温条件下呈现较高脆性，从而在反复荷载作用下更易发生疲劳损伤。

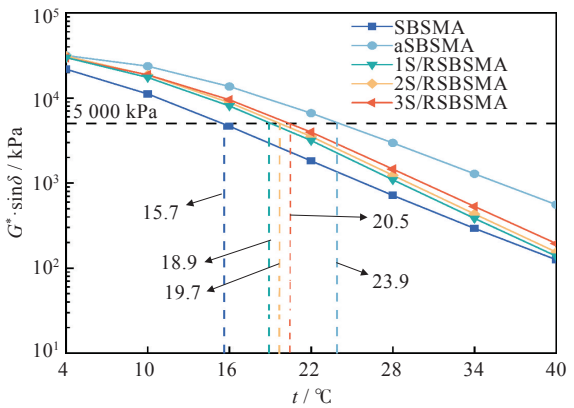

图4　温拌反应再生对老化SBS改性沥青$G^*\cdot\sin\delta$的影响

Fig. 4　Effect of warm-mix reaction-rejuvenated on $G^*\cdot\sin\delta$ of aged SBS modified asphalt

3　结　论

本研究采用PU和BUDGE，利用Sasobit温拌剂，对aSBSMA进行温拌反应再生。通过DSR测试，研究温拌反应再生SBS改性沥青的流变性能。结论如下：

（1）随着Sasobit掺量的增加，温拌反应再生SBS改性沥青的G^*持续增长，δ小幅下降，从而导致温拌反应再生SBS改性沥青的抗剪切变形能力提升，黏性流动能力略有降低。

（2）温拌反应再生SBS改性沥青的高温PG等级为PG82，表明温拌反应再生SBS改性沥青能保持较高的高温抗变形能力。

（3）随着Sasobit掺量的增加，RSBSMA的疲劳临界温度从18.9 ℃升高至20.5 ℃，Sasobit会略微降低RSBSMA在较低温度下的疲劳抗裂性，但温拌反应再生SBS改性沥青仍然保持优异的抗疲劳开裂性能。

参考文献

[1] 马建，赵祥模，贺拴海，等. 路面检测技术综述[J]. 交通运输工程学报，2017，17(5)：121-137.

[2] 樊娟. SBS改性沥青混合料在高速公路路面维修扩建工程中的应用[J]. 中国公路，2021(2)：108-109.

[3] CHEN M Z, LENG B B, WU S P, et al. Physical, chemical and rheological properties of waste edible vegetable oil rejuvenated asphalt binders [J]. Construction and Building Materials, 2014, 66: 286-298.

[4] 梁波，兰芳，郑健龙. 沥青的老化机理与疲劳性能关系的研究进展[J]. 材料导报，2021，35(9)：9083-9096.

[5] XU X, LENG Z, LAN J T, et al. Sustainable practice in pavement engineering through value-added collective recycling of waste plastic and waste tyre rubber [J]. Engineering, 2021, 7(6): 857-867.

[6] CONG P L, WANG J Y, ZHOU Z J, et al. Preparation of rejuvenating agent and property evaluation of rejuvenated SBS modified asphalt binders [J]. Construction and Building Materials, 2020, 233: 117911.

[7] HOU X D, XIAO F P, WANG J G, et al. Identification of asphalt aging characterization by spectrophotometry technique [J]. Fuel, 2018, 226: 230-239.

[8] LENG Z, SREERAM A, PADHAN R K, et al. Value-added application of waste PET based additives in bituminous mixtures containing high percentage of reclaimed asphalt pavement (RAP) [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 196: 615-625.

[9] XU G J, YAO Y S, WU M, et al. Molecular simulation and experimental analysis on co-aging behaviors of SBS modifier and asphalt in SBS-modified asphalt [J]. Molecular Simulation, 2023, 49(7): 629-642.

[10] DONG Z J, ZHOU T, LUAN H, et al. Composite modification mechanism of blended bio-asphalt combining styrene-butadiene-styrene with crumb rubber: a sustainable and environmental-friendly solution for wastes [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 214: 593-605.

[11] 罗艺，程怡，雷新禾，等. 高温剪切时间对废橡胶-沥青相容性的影响[J]. 武汉工程大学学报，2023，45(6)：694-697，705.

[12] WEI C W, ZHANG H L, DUAN H H. The behaviour of rejuvenated SBS-modified asphalt incorporating catalytic-reactive compounded rejuvenator [J]. Road

Materials and Pavement Design, 2022, 23(2): 433-444.

[13] 崔亚楠,崔树宇,郭立典.废机油再生SBS改性沥青的性能及机理[J].建筑材料学报,2022,25(2):164-170.

[14] XU S, YU J Y, HU C B, et al. Laboratory evaluation of rejuvenation effect of reactive rejuvenator on aged SBS modified bitumen [J]. Materials and Structures, 2017, 50(6): 233.

[15] LIU J, YAN K Z, YOU L Y, et al. Laboratory performance of warm mix asphalt binder containing polyphosphoric acid [J]. Construction and Building Materials, 2016, 106: 218-227.

[16] 金鑫,付昊轩,杨野,等.沥青温拌再生剂研究现状与发展趋势[J].材料导报,2023,37(增刊2):23080052.

[17] 傅海彪,郭宽锐.温再生沥青混合料路用性能研究[J].西部交通科技,2021(6):32-34,38.

[18] WANG Z X, LI J G, ZHANG Z Q, et al. Formulation of a new warm-mix recycling agent and its rejuvenating effect on aged asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2020, 262: 120804.

[19] XU X, YU J Y, XUE L H, et al. Effect of reactive rejuvenating system on physical properties and rheological characteristics of aged SBS modified bitumen [J]. Construction and Building Materials, 2018, 176: 35-42.

[20] BOOSHEHRIAN A, MOGAWER W S, BONAQUIST R. How to construct an asphalt binder master curve and assess the degree of blending between RAP and virgin binders [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(12): 1813-1821.

[21] 杨侣珍.温拌剂Sasobit对SBR改性沥青短期老化后性能的影响[J].中外公路,2020,40(2):285-289.

本文编辑:苗 变

☆

(上接第663页)

[12] LI S T, KANG X D, HU J W. Image fusion with guided filtering [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(7): 2864-2875.

[13] LAWS K I. Textured image segmentation[D]. Los Angeles: University of Southern California, 1980.

[14] 彭聪,李万乔,李立仁,等.基于纹理特征提取的多聚焦图像融合方法[J].武汉工程大学学报,2024,46(2):197-202.

[15] NEJATI M, SAMAVI S, SHIRANI S. Multi-focus image fusion using dictionary-based sparse representation [J]. Information Fusion, 2015, 25: 72-84.

[16] XU S, WEI X L, ZHANG C X, et al. MFFW: a new dataset for multi-focus image fusion [Z/OL]. (2020-02-12)[2024-08-09]. https://doi.org/10.48550/arXiv.2002.04780.

[17] QIU X H, LI M, ZHANG L Q, et al. Guided filter-based multi-focus image fusion through focus region detection [J]. Signal Processing: Image Communication, 2019, 72: 35-46.

[18] NENCINI F, GARZELLI A, BARONTI S, et al. Remote sensing image fusion using the curvelet transform[J]. Information Fusion, 2007, 8(2): 143-156.

[19] LI H, MANJUNATH B S, MITRA S K. Multi-sensor image fusion using the wavelet transform[J]. Graphical Models and Image Processing, 1995, 57(3): 235-245.

[20] LI S T, KANG X D, HU J W, et al. Image matting for fusion of multi-focus images in dynamic scenes [J]. Information Fusion, 2013, 14(2): 147-162.

[21] ZHAN K, TENG J C, LI Q Q, et al. A novel explicit multi-focus image fusion method [J]. Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing, 2015, 6(3): 600-612.

[22] ZHOU F Q, LI X S, LI J, et al. Multifocus image fusion based on fast guided filter and focus pixels detection[J]. IEEE Access, 2019, 7: 50780-50796.

[23] MA H Y, LIAO Q M, ZHANG J C, et al. An α-matte boundary defocus model-based cascaded network for multi-focus image fusion [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020, 29: 8668-8679.

[24] WANG Y C, XU S, LIU J M, et al. MFIF-GAN: a new generative adversarial network for multi-focus image fusion [J]. Signal Processing: Image Communication, 2021, 96: 116295.

[25] LIU Z, BLASCH E, XUE Z Y, et al. Objective assessment of multiresolution image fusion algorithms for context enhancement in night vision: a comparative study [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(1): 94-109.

本文编辑:霍淑利