

引文格式:雷蕾,高阳,张脩,等. SBS胶乳改性乳化沥青流变机制及黏附性能[J]. 太原理工大学学报, 2026, 57(2): 407-416.

LEI Lei, GAO Yang, ZHANG Xiao, et al. Rheological mechanism and adhesion properties of SBS latex modified emulsified asphalt[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(2): 407-416.

SBS胶乳改性乳化沥青流变机制及黏附性能

雷 蕾¹, 高 阳¹, 张 脩¹, 曹军生², 王小龙³, 赵 想¹

(1. 太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原; 2. 山西交通养护集团有限公司, 山西 太原;
3. 山西高速集团朔神有限责任公司, 山西 朔州)

摘 要:【目的】SBS改性乳化沥青性能优异, 制备过程中SBS改性沥青黏度较高而难以乳化, 目前存在难以提高SBS改性乳化沥青中SBS掺量的问题。【方法】本文采用先乳化后改性的制备工艺, 首先将SBS乳化为SBS胶乳, 再加入到乳化沥青中制备SBS胶乳改性乳化沥青(SBS latex modified emulsified asphalt, SBS-LMEA)。通过荧光显微试验和傅里叶红外光谱试验比较SBS-LMEA与由先改性后乳化法制备的SBS改性乳化沥青(SBS modified emulsified asphalt, SBS-MEA), 探究SBS胶乳中添加剂对改性乳化沥青微观机理的影响; 通过频率扫描、MSCR、主动黏附试验及拉拔试验评价不同SBS含量下SBS-LMEA的流变机制与黏附性能变化。【结果】结果表明, SBS-LMEA与SBS-MEA在微观结构和官能团上基本一致, 均为物理改性, SBS胶乳中添加剂对改性乳化沥青微观结构和官能团无影响; 与纯乳化沥青相比, SBS含量为8%的SBS-LMEA高温抵抗变形能力和低温变形恢复能力得到大幅提高; 随SBS含量增加, 不可恢复变形减小, 弹性恢复能力增强, Jnr由44 kPa⁻¹降低至0.18 kPa⁻¹, R由14%提升至93%; 抗剥落性能增强, 抗剥落度由10.7%增至50.9%; 拉拔强度从0.54提升至1.54 MPa。

关键词: SBS胶乳; 改性乳化沥青; 动态剪切流变试验; 微观机理; 黏附性能

中图分类号: TB322 **文献标识码:** A

DOI: 10.16355/j.tyut.1007-9432.20230688

文章编号: 1007-9432(2026)02-0407-10

Rheological Mechanism and Adhesion Properties of SBS Latex Modified Emulsified Asphalt

LEI Lei¹, GAO Yang¹, ZHANG Xiao¹, CAO Junsheng², WANG Xiaolong³, ZHAO Xiang¹

(1. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China; 2. Shanxi Traffic Maintenance Group Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, China; 3. Shanxi High Speed Group Shuoshen Group Co., Ltd., Shuozhou, Shanxi, China)

Abstract: 【Purposes】SBS modified emulsified asphalt has excellent performance, but it is difficult to emulsify SBS modified asphalt in its preparation process because of its high viscosity. 【Methods】In this paper, SBS latex modified emulsified asphalt (SBS-LMEA) was prepared by first emulsifying SBS into SBS latex and then adding the SBS Latex it into emulsified asphalt. By comparing SBS-LMEA with SBS modified emulsified asphalt (SBS-MEA) with fluorescence microscopy and Fourier infrared spectroscopy, the effects of additives in SBS latex on the microscopic mechanism of

收稿日期: 2023-09-22; 修回日期: 2024-01-26

基金项目: 山西省交通运输厅科技项目(2020-1-6, 2022-02-01); 山西省科学技术厅自由探索类项目(20210302124326); 山西交通控股集团有限公司科技项目(22-JKKJ-18)

第一作者: 雷蕾, 硕士研究生, (E-mail) 1321072576@qq.com

通信作者: 张脩, 博士, 教授, 主要从事可持续交通基础设施研究, (E-mail) zhangxiao01@tyut.edu.cn

modified emulsified asphalt were investigated. The rheological mechanism and adhesion properties of SBS-LMEA with different SBS contents were evaluated through frequency scanning, MSCR, active adhesion test, and pull-out test. **【Results】** The results show that the microstructure and functional groups of SBS-LMEA and SBS-MEA are basically the same, and both belong to physical modifications. The additives in SBS latex have no effect on the microstructure and functional groups of modified emulsified asphalt. Compared with those of pure emulsified asphalt, the high temperature deformation resistance and low temperature deformation recovery ability of SBS-LMEA with SBS content of 8% are greatly improved. With the increase of SBS content, the irrecoverable deformation decreases, the elastic recovery ability increases, J_{nr} decreases from 44 to 0.18 kPa^{-1} , R increases from 14% to 93%, the resistance to spalling increases from 10.7% to 50.9%, and the drawing strength increases from 0.54 to 1.54 MPa.

Keywords: SBS latex; modified emulsified asphalt; dynamic shear rheometer test; micromechanism; adhesion performance

改性乳化沥青具有改性沥青和乳化沥青的双重优点,以SBS作为改性剂制备的SBS改性乳化沥青高低温性能提升,且有良好的经济价值,被广泛应用于路面施工与科研试验^[1]。目前存在三种SBS改性乳化沥青的制备工艺:先改性后乳化、先乳化后改性、边改性边乳化。研究表明,采用先改性后乳化或边改性边乳化都需克服SBS改性沥青的高黏度特性,制备难度较大^[2]。目前综合相容性及路用性能,两种工艺制备的产品中SBS掺量往往控制在5%以内^[3,4],无法较大提高改性乳化沥青性能。

先乳化后改性的制备工艺可以克服SBS改性沥青高黏性而难以制备以及SBS掺量低的缺陷,同时在制备改性乳化沥青过程中可以达到节能减排的效果^[5]。SBS胶乳具有良好的物理力学性能^[6],将其用于改性乳化沥青时,软化点随SBS含量增加而得到提升^[7]。通过观察分析SBS胶乳改性乳化沥青的微观结构,认为SBS胶乳与乳化沥青之间具有良好的相容性和稳定性^[8]。通过SARA分析法发现,SBS胶乳的加入有利于提高沥青的稳定性、黏附性等性能^[9]。提高SBS胶乳含量有利于提高改性乳化沥青的抗车辙、抗疲劳性能,并且SBS胶乳改性沥青比SBS颗粒改性沥青的抗疲劳性能更好^[10]。

利用溶剂将SBS溶解后加入乳化剂与稳定剂乳化而成SBS胶乳。其中溶剂、乳化剂等外掺剂是否对SBS胶乳改性乳化沥青的物化特征具有影响,目前还没有明确的研究结论。明确SBS胶乳对乳化沥青改性机理的影响以及SBS-LMEA流变及黏附性能的研究对于研发高SBS掺量SBS-LMEA具有重要意义。本文采用荧光显微镜、傅里叶红外光谱、动态剪切流变试验、主动黏附试验和拉拔试验,

对SBS-MEA和SBS-LMEA的微观结构和官能团进行对比研究,对SBS-LMEA的流变性能与黏附性能进行量化研究,探讨SBS胶乳及SBS含量对改性乳化沥青的相关性能影响。

1 试验材料及方案

1.1 试验材料及试样制备

星型SBS胶乳的原材料如表1。首先将SBS充分溶解于复配溶剂中制备成SBS溶液,并置于50℃下保温30 min。同时将乳化剂、稳定剂与65℃去离子水混合为皂液,然后将SBS溶液与皂液在60℃下剪切乳化即可制备得到均匀稳定的SBS胶乳,具体制备流程见图1^[11]。同时将70#沥青乳化为乳化沥青,再将SBS胶乳与乳化沥青混合均匀,即可制得SBS胶乳改性乳化沥青(SBS latex modified emulsified asphalt, SBS-LMEA),SBS含量(SBS占乳化沥青的质量百分比)分别为0%、1%、2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%,将制备得到的样品分别表示为EA、SBS-LMEA-1、……、SBS-LMEA-8。制得的SBS胶乳为水包油结构,能更好地与乳化沥青相容并发挥改性效果。SBS胶乳及乳化沥青的基本性能如表2、表3所示。此外,依照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)的T0651—1993中所述的方法,制备SBS胶乳改性乳化沥青蒸发残留物。

1.2 试验方案

1.2.1 荧光显微镜观察

为了研究SBS胶乳对SBS改性乳化沥青微观结构的影响,本研究使用放大倍数为100倍的荧光显微镜观察SBS改性乳化沥青和自制SBS胶乳改

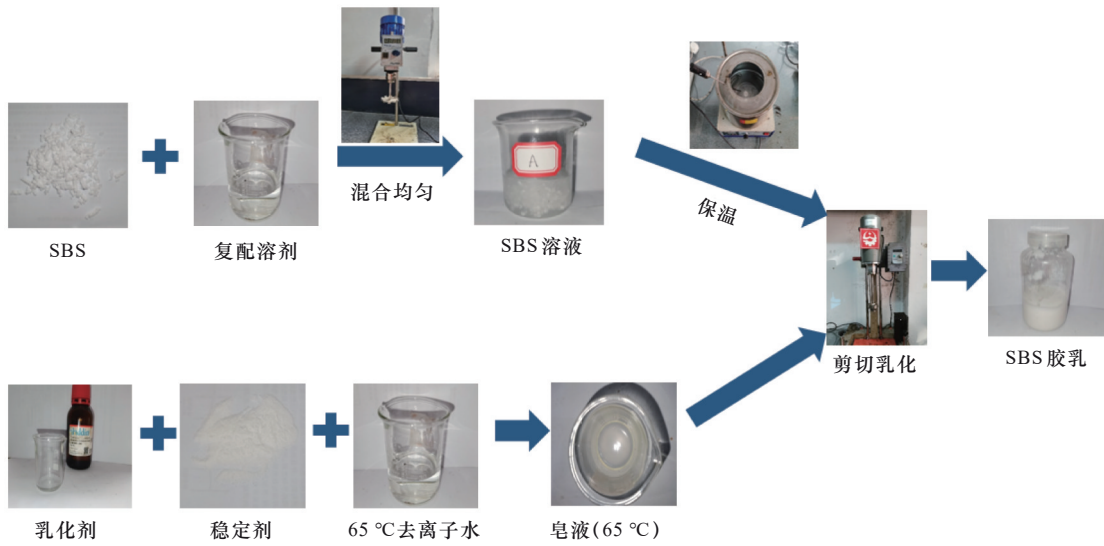


图1 SBS胶乳制备流程图

Fig.1 Flow chart of SBS latex preparation

表1 星型SBS胶乳原材料

Table 1 Raw materials

原材料	成分
Star-SBS	SBS4303
复配溶剂	乙酸乙酯、环己烷
阳离子乳化剂	十六烷基三甲基溴化铵
非离子乳化剂	壬基酚聚氧乙烯醚
稳定剂	无水氯化钙、聚乙烯醇
pH调节剂	盐酸

表2 SBS胶乳的基本性能

Table 2 Basic properties of SBS latex

测试项目	SBS胶乳
固含量/%	20
150目筛上剩余量/%	0.05
布氏黏度(26℃)/(mPa·s)	2870
储存稳定性(1d)/%	1.07
储存稳定性(5d)/%	2.16

表3 乳化沥青的基本性能

Table 3 Basic properties of emulsified asphalt

测试对象	测试项目	值
乳化沥青	固含量/%	65.8
	1.18 mm筛上剩余量/%	0.9
	储存稳定性(1d)/%	1.84
	软化点(5℃)/℃	53.78
	针入度(25℃)/0.1 mm	61.8
蒸发残留物	延度(5℃)/mm	77
	120℃	1 450
	布氏黏度/(mPa·s)	900
	150℃	353
	165℃	120

性乳化沥青的蒸发残留物,并采用 Image Pro Plus 软件对图像进行处理,研究微观结构的变化。

1.2.2 FTIR 测试

对SBS改性乳化沥青和自制SBS胶乳改性乳化沥青的蒸发残留物进行FTIR测试,并通过观察特征峰的变化来判断SBS胶乳对SBS改性乳化沥青的影响。对不同SBS含量的SBS-LMEA进行FTIR测试,通过拟合特征峰的峰高、峰面积与SBS含量之间的线性关系来评价SBS含量对SBS-LMEA的影响。

1.2.3 流变性能测试

对不同SBS含量的SBS-LMEA进行流变性能测试。根据ASTM D7175进行频率扫描试验,测试频率范围0.1~100 rad/s,温度范围为25℃。依据ASTM D7405进行多应力蠕变恢复试验,试验温度为50℃,应力水平分别为0.1和3.2 kPa。

1.2.4 主动黏附试验

为研究不同SBS含量SBS-LMEA的抗剥落性能,称取A档(19 mm)、B档(16 mm)集料各500 g,蒸发残留物用量为1.5%(7.5 g),以上原材料均放置于165℃下保温2 h。首先将蒸发残留物与A档拌合均匀,拌合时间为90 s;再将干净的B档集料与裹覆沥青的A档集料拌合90 s,拌合完成后于室温下冷却,试验原理如图2^[12]。对A档集料称重,计算未被剥落的沥青占总乳化沥青蒸发残留物质量的比值,作为抗剥落度 δ ,计算公式见式(1)。

$$\delta = \frac{M_2 - M_1}{M_a} \times 100. \quad (1)$$

式中, δ 为A档集料的抗剥落度,单位为%; M_a 为总

乳化沥青蒸发残留物质量,单位为g,选取 M_a 为7.5 g; M_1 为A档集料的质量,单位为g; M_2 为二次拌合后,未被剥落沥青与A档集料的质量,单位为g。

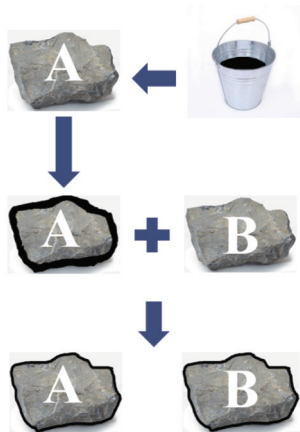


图2 主动黏附试验基本原理

Fig.2 Basic mechanism of active adhesion

1.2.5 拉拔试验

为研究不同SBS含量SBS-LMEA的层间黏附性,采用UTM-30进行拉拔试验。首先将蒸发残留物放置于两个混凝土块之间,压缩厚度至1 mm使试件组合成型,放置于25℃下保温1 h后进行拉拔试验,拉拔速度为10 mm/min。

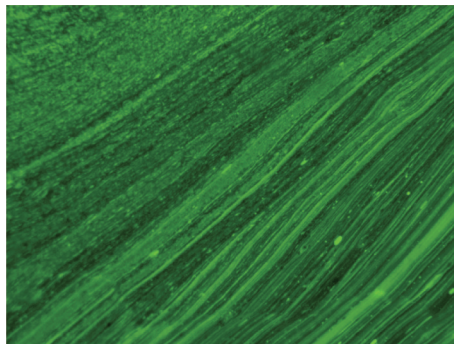
2 微观特性分析

2.1 荧光显微镜试验结果分析

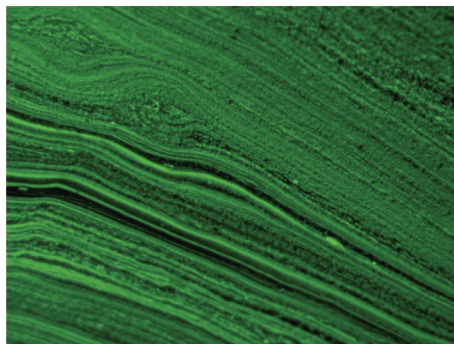
通过荧光显微镜观测了SBS含量皆为5%的SBS-MEA蒸发残留物与SBS-LMEA蒸发残留物的微观形貌。通过对比图3(a)、(b),SBS-LMEA与SBS-MEA的微观物理结构基本一致,SBS在改性乳化沥青蒸发残留物中均构建起网状结构。其中SBS为连续相,沥青以分散相填充在SBS的网状结构中^[13,14]。这表明SBS胶乳与固态SBS对乳化沥青的改性作用并未改变SBS的网状结构。

2.2 FTIR测试结果分析

采用FTIR对SBS含量皆为5%的SBS-MEA蒸发残留物与SBS-LMEA蒸发残留物中官能团的变化进行了分析,如图4。三种乳化沥青的光谱中都有共同的峰,如747、1 375、1 460、1 570、2 852、2 922 cm^{-1} ,这些峰为沥青的特征峰。而经改性的SBS-MEA与SBS-LMEA光谱中存在699、966 cm^{-1} 两处特征峰,这两个峰为SBS特有,它们的存在分别代表着SBS中PS段和PB段的存在^[15]。因此在制备SBS-MEA与SBS-LMEA过程中均未出现新的官能团,SBS的改性机理皆为物理改性。



(a) SBS-MEA



(b) SBS-LMEA

图3 SBS-MEA与SBS-LMEA蒸发残留物的微观结构

Fig.3 Microstructures of evaporation residues of SBS-MEA and SBS-LMEA

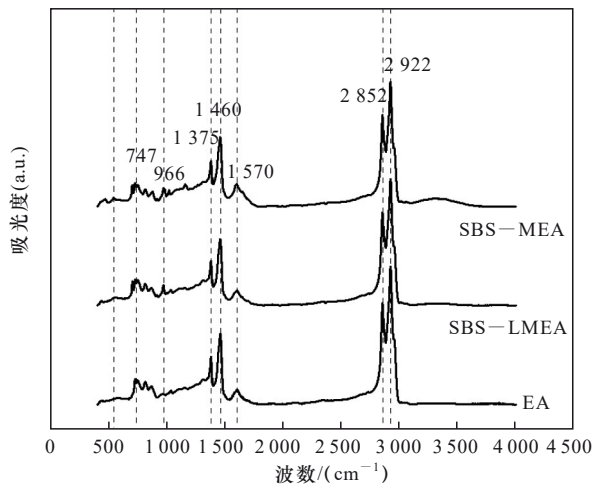
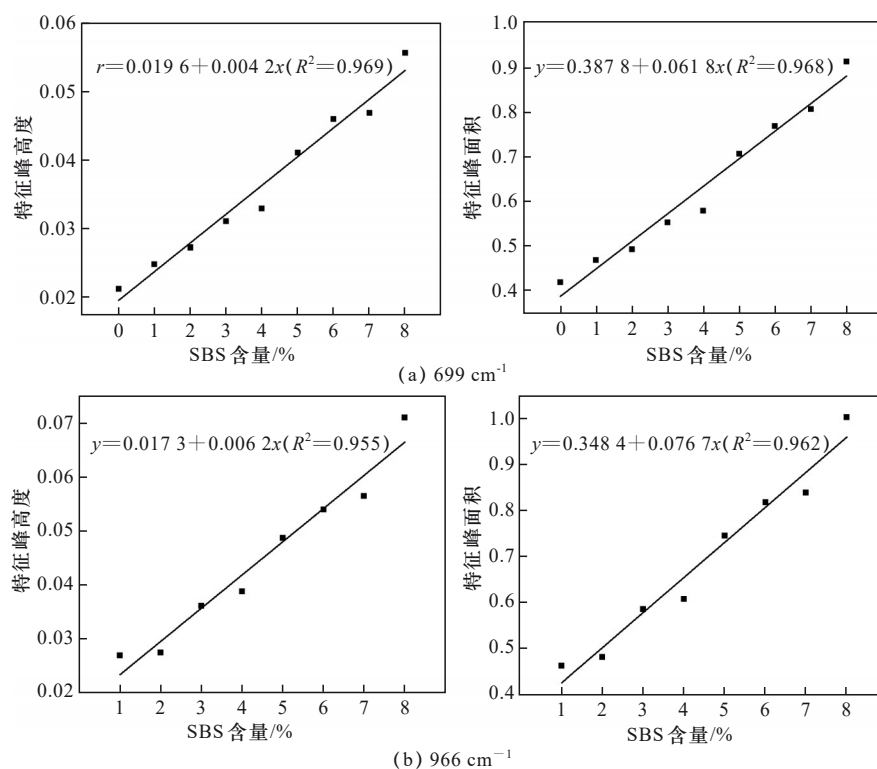


图4 EA、SBS-MEA和SBS-LMEA的FTIR

Fig.4 FTIR spectra of EA, SBS-MEA, and SBS-LMEA

由微观结构以及其官能团变化分析,认为SBS-MEA与SBS-LMEA在制备机理以及化学成分上并无很大差异,而利用SBS胶乳对乳化沥青进行改性更具环保性且能实现SBS高掺量的目的。

为充分观察不同掺量下SBS含量对SBS-LMEA官能团的影响,本研究量化分析了不同SBS含量的SBS-LMEA中官能团的吸收峰峰高和面积,如图5。从图中可以看出,699与966 cm^{-1} 处特征峰高与特征峰的面积皆随SBS含量增大而增大。

图5 699、966 cm⁻¹处峰高、峰面积与SBS含量的关系曲线Fig.5 Relationship curves between peak height, peak area, and SBS latex solid content at 699 and 966 cm⁻¹

对吸收峰峰高、峰面积与SBS含量进行线性拟合。图5所示,699与966 cm⁻¹处峰高与峰面积与SBS含量呈良好的线性关系,这两处峰的峰高与峰面积都随SBS含量增加而增加。进一步地说,随SBS含量增加,699、966 cm⁻¹处峰高分别以0.004 2、0.006 2的速率增加,峰面积分别以0.061 8、0.076 7的速率增加。因此,随SBS含量增加,软段(PB)增加速度较快,即SBS-LMEA柔性片段增加效率更高,材料会更多表现出弹性^[16]。

3 流变性能分析

3.1 频率扫描结果

通过频率扫描试验得到不同SBS-LMEA的复数剪切模量 G^* 。 G^* 是反映沥青在剪切力作用下的抗力的重要参数。以25℃下的 G^* 为参考值,采用Sigmoidal模型进行主曲线参数拟合^[17],得到 G^* 主曲线如图6。由图可得,宽频率范围内,同一浓度下,由于沥青的粘弹性性质, G^* 随频率升高而增大^[18]。

SBS含量对 G^* 也有显著影响。在同一频率下进行观测时,主曲线随SBS含量的变化规律并不单一,当达到某一频率时,主曲线的变化规律会发生改变。为更好地观察规律,将 G^* 主曲线分为三个有限频域下的主曲线:10⁻⁴~10⁻¹ Hz、10⁻¹~10³ Hz、10³~10⁶ Hz。图7(a)可以看出,10⁻⁴~10⁻¹ Hz内随

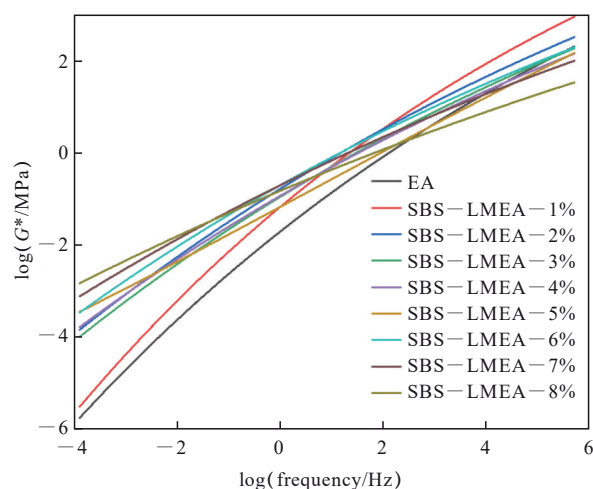


图6 宽频域内不同SBS含量SBS-LMEA的主曲线

Fig.6 Master curves of SBS-LMEA with different SBS latex solid contents in broadband frequency domain

SBS含量增加, G^* 呈现出规律性的上升趋势。这说明加入SBS后,改性沥青的流动性降低,抗剪切变形能力得到了有效增强。在10⁻¹~10³ Hz内,材料处于黏弹性变化交界处,主曲线出现了交错变化。图7(c)则显示在10³~10⁶ Hz内,随SBS含量增加, G^* 呈现出下降趋势。同时基于时温等效原理^[19],这也表明SBS会使材料在低温(高频)状态下能得到更好的变形恢复能力,在高温(低频)状态下有更好的抵抗变形能力。

通过对log G^* 值与SBS含量之间的线性关系曲

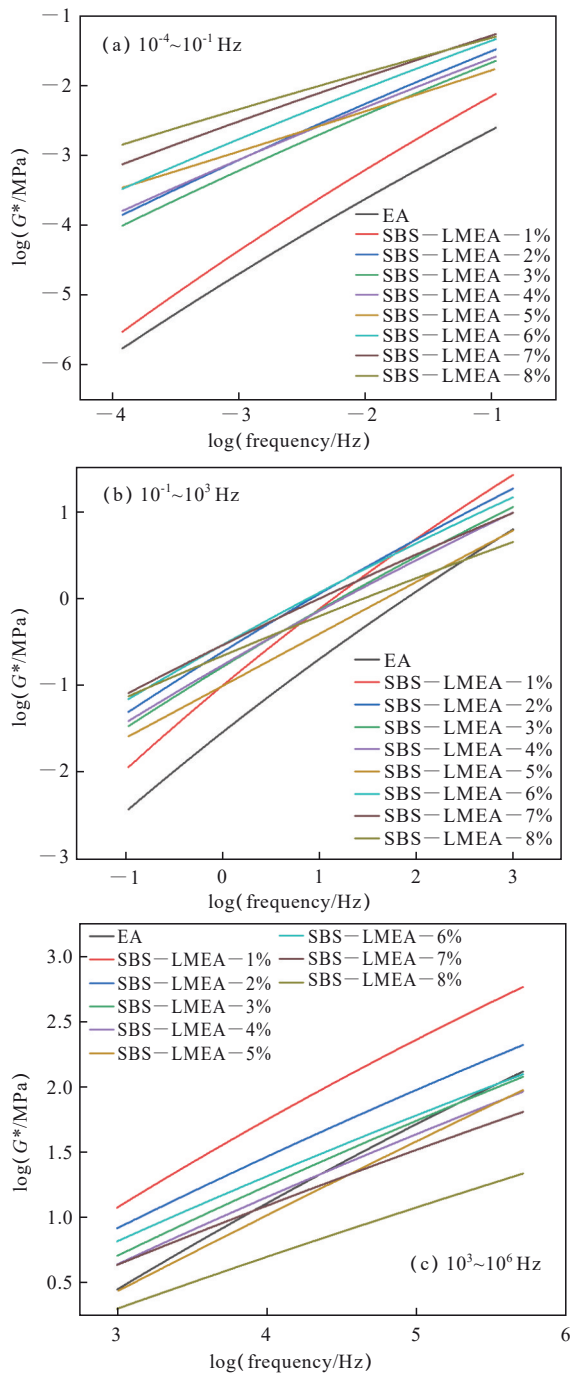


图 7 有限频域内不同 SBS 含量的 SBS-LMEA 的主曲线
Fig.7 Master curves of SBS-LMEA with different SBS latex solid contents in the finite frequency domain

线进行拟合,如图 8 所示,模型的拟合相关系数为 0.85,说明线性模型能较好地描述 SBS 含量与 $\log G^*$ 之间的关系。在频率为 100 Hz 下,随 SBS 含量增加, $\log G^*$ 呈下降趋势,下降速率为 -0.1581 。这表明在高频段,随 SBS 含量增加,材料更倾向于表现弹性^[20]。

3.2 MSCR 结果

沥青的弹性恢复速率 R 反映了沥青在一定压力下的回弹能力。如图 9(a), R 值受 SBS 含量和应力水平的影响显著。在 SBS 含量相同的情况下,

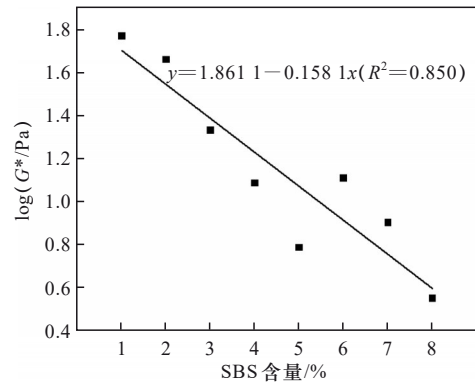


图 8 在 100 Hz 下 SBS 含量与 G^* 的关系曲线
Fig.8 Relationship curve between SBS latex solid content and G^* at 100 Hz

SBS-LMEA 在 3.2 kPa 应力水平下的 R 值小于 0.1 kPa 应力水平下的 R 值,说明在高应力水平下的 SBS-LMEA 的弹性变形相对较小^[19]。当应力水平相同时, R 值随 SBS 含量增加而有增加的趋势, SBS 含量增加到 2% 时, R 值有较大幅度增加,并随含量进一步增加而呈平稳增加的趋势。

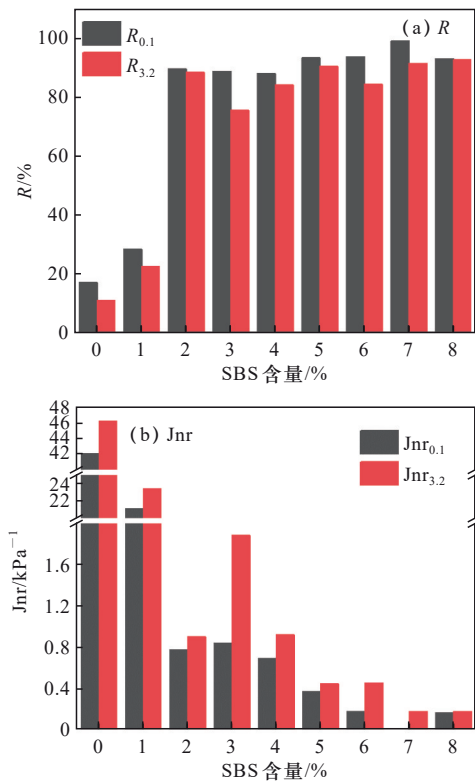


图 9 两种应力水平 (0.1、3.2 kPa) 下不同 SBS 含量 SBS-LMEA 的
(a) R 值和 (b) J_{nr}
Fig.9 (a) R values and (b) J_{nr} of SBS-LMEA with different SBS latex solid contents at two stress levels (0.1 and 3.2 kPa)

用 J_{nr} 来评价在一定压力下的 SBS-LMEA 的不可恢复性变形。从图 9(b) 的趋势可以看出,随 SBS 含量增加, J_{nr} 值逐渐减小。同时,应力水平也对 SBS-LMEA 的 J_{nr} 值产生影响, J_{nr} 值随应力水平

的升高而增加。这说明高 SBS 掺量 SBS-LMEA 在较高应力水平下会出现更明显的不可恢复性变形。

建立描述 R 值和 J_{nr} 值随 SBS 含量变化趋势的模型,如图 10。通过拟合相关系数可以看出, J_{nr} 的对数值与 SBS 含量呈线性关系, J_{nr} 随 SBS 含量增加, $J_{nr_{0.1}}$ 、 $J_{nr_{3.2}}$ 分别以 0.333 4、0.285 8 的速率减少,

表明 J_{nr} 受 SBS 的影响较大,即 SBS 含量的增加可以减少其不可恢复性变形。 R 的对数值与 SBS 含量之间的关系符合 ExpAssoc 函数,随着 SBS 含量的增加, R 呈逐渐上升的趋势,在 SBS 含量增加到 2% 后 R 受 SBS 含量降低的影响变小。

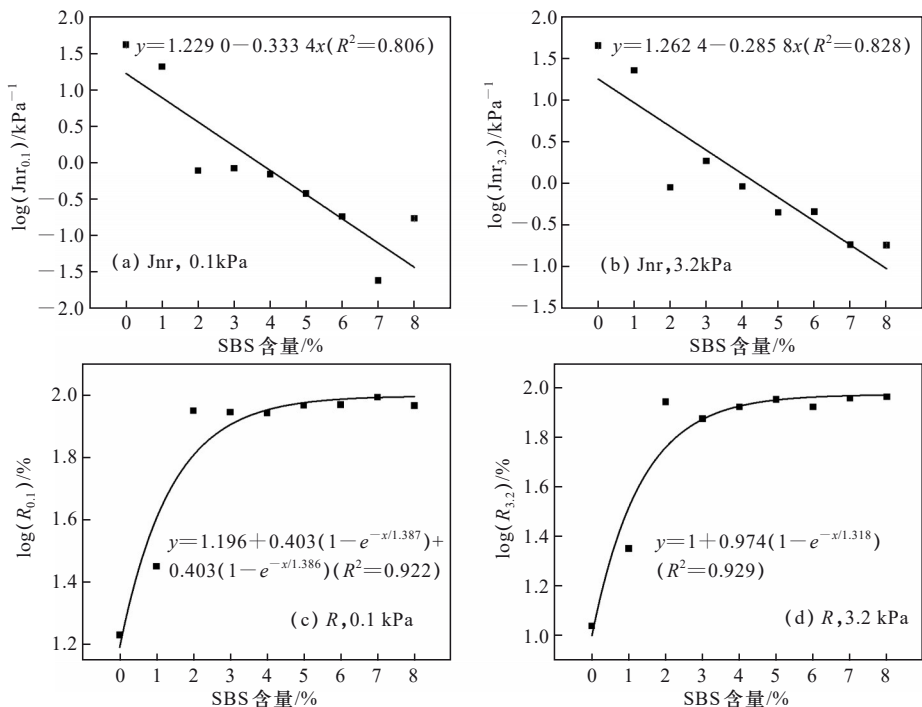


图 10 两种应力水平(0.1、3.2 kPa)下 SBS 含量分别与不同 SBS 含量 SBS-LMEA 的 R 值和 J_{nr} 的关系曲线
Fig.10 Relationship curves between SBS latex solid content and R value or J_{nr} of SBS-LMEA with different SBS latex solid contents at two stress levels (0.1 and 3.2 kPa)

4 黏附性能分析

4.1 抗剥落性能分析

集料表面沥青薄膜的抗剥落性能反映沥青与集料的黏附性,若沥青膜剥落状况明显,说明沥青与集料的黏附性差^[21]。当蒸发残留物用量较少(1.5%),A 档集料表面裹覆沥青薄膜,干净的 B 档集料与 A 档集料混合时,可使 A 档集料表面沥青薄膜剥落。为评价 SBS-LMEA 蒸发残留物在集料表面的裹覆能力与抗剥落能力,进行主动黏附试验,试验数据见表 4。图 11 展示了 SBS-LMEA 蒸发残留物的抗剥落度 δ ,未改性的乳化沥青蒸发残留物的抗剥落度为 10.7%,随 SBS 含量增多,蒸发残留物的抗剥落性能逐渐增加,当 SBS 含量为 8% 时,抗剥落度增加到 50.9%。

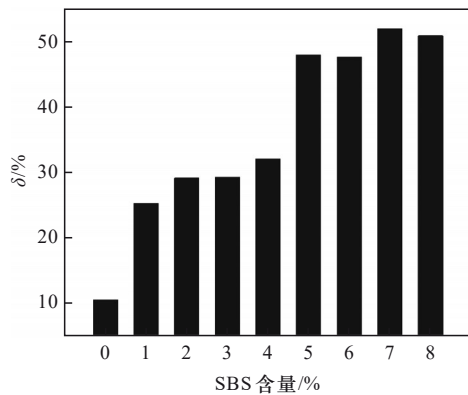
4.2 拉拔试验结果分析

图 12(a)是未改性的乳化沥青蒸发残留物随时间变化的拉拔强度,纯乳化沥青蒸发残留物的破坏

表 4 主动黏附试验结果
Table 4 Active adhesion test data

SBS 含量/%	M_a/g	M_1/g	M_2/g	$\delta/\%$
0	7.5	500.05	500.85	10.67
1	7.5	500.08	501.98	25.33
2	7.5	499.90	502.09	29.20
3	7.5	500.13	502.33	29.33
4	7.5	499.92	502.33	32.13
5	7.5	499.88	503.48	48.00
6	7.5	500.10	503.68	47.73
7	7.5	499.89	503.80	52.13
8	7.5	500.02	503.84	50.93

模式是黏聚-黏附混合失效^[22, 23]。破坏分为两个阶段,初始阶段为黏聚-黏附共同作用阶段,到达峰值时即为黏附失效破坏,沥青从界面剥离。然后进入第二阶段黏聚作用阶段,这个阶段沥青自身的黏聚性作用,随时间推移沥青的黏聚力逐渐减小,在 5 s 内迅速接近 0 MPa 后到达完全失效状态。图 12(b)是 SBS 含量为 5% 时,界面失效形式为黏聚破坏,在 2 s

图 11 不同 SBS 含量 SBS-LMEA 的抗剥落度 δ Fig.11 Spalling resistance δ of SBS-LMEA with different SBS contents

时达到最大应力,之后应力随时间逐渐下降,约 100 s 后降为 0。未改性的乳化沥青在作为层间黏结材料时抗拉拔强度较低,当达到临界值时迅速发生黏附破坏,而 SBS-LMEA 的抗拉能力更优,并且应力的下降速率较慢,破坏过程缓慢。根据观察试验过程发现当 SBS 含量为 0~3% 范围内,蒸发残留物的破坏模式都是黏聚-黏附混合失效,而当 SBS 含量大于 4% 后,蒸发残留物与界面的黏附能力较强,破坏模式为黏聚失效。

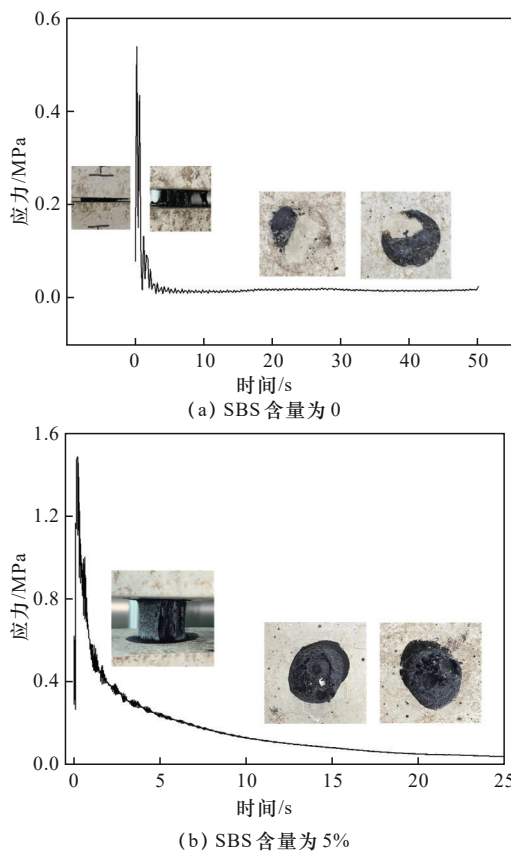
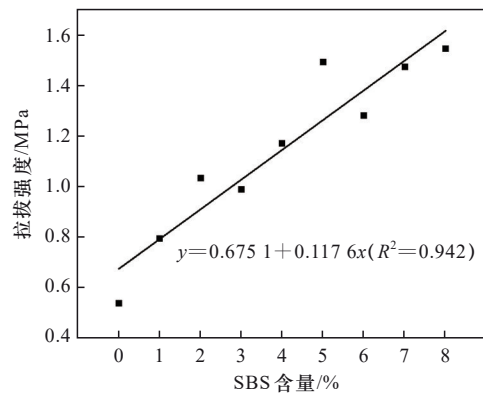
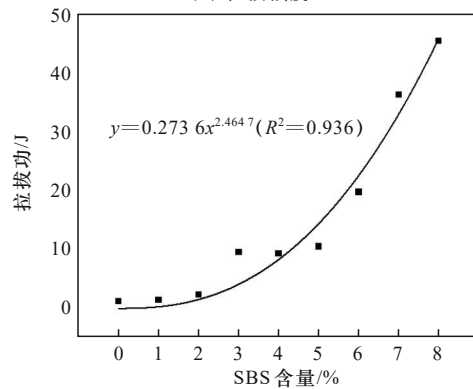


图 12 SBS-LMEA 蒸发残留物的拉拔试验应力变化

Fig.12 Stress curves in pull-out tests of SBS-LMEA evaporative residues



(a) 拉拔强度



(b) 拉拔功

图 13 不同 SBS 含量 SBS-LMEA 的拉拔强度与拉拔功

Fig.13 Drawing strength and work changes of SBS-LMEA with different SBS contents

改性胶乳使乳化沥青蒸发残留物的层间拉拔强度得到提高。如图 13,未经改性的乳化沥青蒸发残留物的拉拔强度为 0.54 MPa,随 SBS 含量增加,强度逐渐增大,当 SBS 含量增加至 8% 时拉拔强度可提升至 1.54 MPa,抗拉拔强度增加了 185%,层间黏附性能大幅度提升,获得较好的改性效果。SBS 含量为 0 时拉拔功仅为 1.21 J,随 SBS 含量增加拉拔功逐渐增大,SBS 含量为 8% 时,拉拔功为 45.57 J,较纯乳化沥青蒸发残留物增加了 36 倍。根据 Allometric 模型,拟合表明拉拔功与 SBS 含量之间存在幂函数关系,当 SBS 含量增加时,拉拔功呈幂函数形式上升^[24-26]。

5 结论

本研究通过荧光显微镜、FTIR、DSR、主动黏附试验、拉拔试验,研究了 SBS-MEA 和 SBS-LMEA 的微观结构和官能团的变化,评价了不同 SBS 含量(0%、1%、2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%)的 SBS-LMEA 的流变及黏附性能。主要结论如下:

1) SBS-MEA 和 SBS-LMEA 中 SBS 的改性机理均为物理改性;且在微观下,二者蒸发残留物中

SBS均构建起网状结构。

2) 在 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ Hz 内, SBS-LMEA 的 G^* 随 SBS 含量增加而增加, $10^3 \sim 10^6$ Hz 与之相反。材料在低温状态下能得到更好的变形恢复能力, 而在高温状态下有更好的抵抗变形能力。

3) 随 SBS 含量增加, SBS-LMEA 的永久应变减小, 弹性恢复速率增加。纯乳化沥青蒸发残留物的 J_{nr} 、 R 分别为 44 kPa^{-1} 、14%, 当 SBS 含量为 8%

时, J_{nr} 减小为 0.18 kPa^{-1} , R 增加为 93%。

4) 纯乳化沥青蒸发残留物的抗剥落度为 10.7%, 随 SBS 含量增加抗剥落性能逐渐增强, SBS 含量为 8% 时增至 50.9%; 纯乳化沥青蒸发残留物的拉拔强度为 0.54 MPa, 随 SBS 含量增加层间黏附性能逐渐增强, SBS 含量为 8% 时, 拉拔强度提升至 1.54 MPa。

参考文献

- [1] FORBES A, HAVERKAMP R G, ROBERTSON T, et al. Studies of the microstructure of polymer-modified bitumen emulsions using confocal laser scanning microscopy[J]. *Journal of Microscopy*, 2001, 204(Pt 3): 252-257.
- [2] 宓旭东, 姚鸿儒, 周晓龙, 等. SBS 改性乳化沥青制备及其应用研究进展[J]. *石油沥青*, 2022, 36(3): 39-45, 61.
FU X D, YAO H R, ZHOU X L, et al. Research progress on preparation and application of SBS modified emulsified asphalt[J]. *Petroleum Asphalt*, 2022, 36(3): 39-45, 61.
- [3] 王燕婷, 董元帅, 侯芸, 等. SBS 改性乳化沥青最佳乳化因素及性能研究[J]. *中外公路*, 2018, 38(6): 238-242.
WANG Y T, DONG Y S, HOU Y, et al. Study on optimum emulsifying factors and properties of SBS modified emulsified asphalt[J]. *Journal of China Foreign Highway*, 2018, 38(6): 238-242.
- [4] 王红, 王子军, 王翠红, 等. SBS 改性乳化沥青储存稳定性研究[J]. *石油学报(石油加工)*, 2013, 29(6): 1009-1014.
WANG H, WANG Z J, WANG C H, et al. Investigation on storage stability of sbs modified asphalt emulsion[J]. *Acta Petrolel Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2013, 29(6): 1009-1014.
- [5] 罗正斌. 沥青用 SBS 胶乳的制备及其在微表处中的应用[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [6] WEI R Z, LUO Y W, ZENG W, et al. Styrene-butadiene-styrene triblock copolymer latex via reversible addition-fragmentation chain transfer miniemulsion polymerization[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(47): 15530-15535.
- [7] 曾望. RAFT 乳液聚合制备聚(苯乙烯-*b*-丁二烯-*b*-苯乙烯)胶乳及其在改性(乳化)沥青中的应用[D]. 浙江: 浙江大学, 2012.
- [8] HE R, LIANG Y, GAO L, et al. Preparation and performance assessment of asphalt emulsion modified by the fabricated sbs latex[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 6699416.
- [9] CAI H M, WANG T, ZHANG J Y, et al. Preparation of an SBS latex-modified bitumen emulsion and performance assessment[J]. *Pet Sci Technol*, 2010, 28(10): 987-996.
- [10] REN S S, LIU X Y, FAN W Y, et al. Rheological properties, compatibility, and storage stability of sbs latex-modified asphalt[J]. *Materials*, 2019, 12(22): 3683.
- [11] 李廷. SBS 胶乳研制及其在微表处中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [12] CUI P, WU S, XIAO Y, et al. Quantitative evaluation of active based adhesion in Aggregate-Asphalt by digital image analysis[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2019, 33(14): 1544-1557.
- [13] 王明, 刘黎萍. 基于荧光显微镜的 SBS 改性沥青显微相态分析[J]. *交通科学与工程*, 2014, 30(3): 10-14.
WANG M, LIU L P. Investigation of the microscopic phase of SBS modified bitumen with fluorescence microscope (FM)[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2014, 30(3): 10-14.
- [14] 肖云, 袁燕, 张肖宁. SBS 微观分散状态与改性沥青性能的关系[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2005(8): 83-86.
XIAO Y, YUAN Y, ZHANG X N. Relationship between SBS microdispersion state and properties of modified asphalt[J]. *Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition)*, 2005(8): 83-86.
- [15] LUO S, TIAN J, LIU Z, et al. Rapid determination of styrene-butadiene-styrene (SBS) content in modified asphalt based on Fourier transform infrared (FTIR) spectrometer and linear regression analysis[J]. *Measurement*, 2020, 151: 107204.
- [16] HERNÁNDEZ G, MEDINA E M, SÁNCHEZ R, et al. Thermomechanical and rheological asphalt modification using styrene-butadiene triblock copolymers with different microstructure[J]. *Energy & fuels*, 2006, 20(6): 2623-2626.
- [17] LIU L, CHENG H, SUN L, et al. Quantifying physical and rheological properties of trichloroethylene-asphalt system to improve performance evaluation of recycled asphalt[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 367: 133018.
- [18] 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 G L, QIN H, YAN R, et al. Evaluation of multiple regeneration effect of SBS modified asphalt based on viscoelastic prop-

- erties[J].Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition),2019,47(7):75-82.
- [19] 周纯秀,王璐,张中丽,等.超硬质沥青改性结合料流变性能分析[J].哈尔滨工业大学学报,2020,52(9):144-151.
ZHOU C X,WANG L,ZHANG Z H 1,et al.Analysis of rheological properties of super hard asphalt modified binders[J].Journal of Harbin Institute of Technology,2020,52(9):144-151.
- [20] LIU L Y,CHENG H L,SUN L J,et al.Quantifying physical and rheological properties of trichloroethylene-asphalt system to improve performance evaluation of recycled asphalt[J].Journal of Cleaner Production,2022,367:11.
- [21] 郝培文,丁丰利,刘策.沥青四组分对沥青与集料黏附-黏聚性的影响[J].中国科技论文,2022,17(12):1396-1401.
HAO P W,DING F L,LIU C.Effect of four component sofa sphalt on adhesion and cohesion between asphalt and aggregat[J].China Science Paper,2022,17(12):1396-1401.
- [22] CANESTRARI F,CARDONE F,GRAZIANI A,et al.Adhesive and cohesive properties of asphalt-aggregate systems subjected to moisture damage[J].Road Materials and Pavement Design,2010,11(sup1):11-32.
- [23] 易军艳,曹一翔,王东升,等.钨酸锆填料与沥青的粘附与水损害特性[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(3):127-131.
YI J Y,CAO Y X,WANG D S,et al.Adhesive bond and moisture damage mechanism of asphalt mastic made with zirconium tungstate[J].Journal of Harbin Institute of Technology,2017,49(3):127-131.
- [24] ZHANG X J,FENG H X,LI X M,et al.Effect of material composition on cohesion characteristics of styrene-butadiene-styrene-modified asphalt using surface free energy[J].Advances in Materials Science and Engineering,2017,2017:9832406.
- [25] LI B,LI X,KUNDWA M J,et al.Evaluation of the adhesion characteristics of material composition for polyphosphoric acid and SBS modified bitumen based on surface free energy theory[J].Constr Build Mater,2021,266:121022.
- [26] ZHANG K,LUO Y.Interlaminar performance of waterproof and cohesive materials for concrete bridge deck under specific test conditions[J].J Mater Civ Eng,2018,30(8):04018161.

(编辑:万 佳)