

文章编号:1007-9629(2021)02-0385-08

PVP 修饰石墨烯对 SBS 改性沥青流变性能的影响

蒋文韬¹, 郝培文¹, 赵超志², 仵涛², 李德文²

(1. 长安大学 道路结构与材料交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 陕西省交通建设集团, 陕西 西安 710075)

摘要: 为研究经聚乙烯吡咯烷酮(PVP)处理后的石墨烯对 SBS 改性沥青流变性能的影响,通过高速剪切机在 SBS 改性沥青中掺入 PVP 修饰石墨烯,制备了石墨烯-SBS 复合改性沥青,并采用动态剪切流变仪、温度扫描和线性振幅扫描试验,对复合改性沥青流变性能及抗疲劳性能变化规律进行研究,同时结合弯曲梁流变仪试验探索了复合改性沥青低温抗裂性的变化规律. 试验结果表明: PVP 修饰石墨烯的掺入能够有效改善 SBS 改性沥青在高温条件下的抗变形、弹性恢复能力以及抗疲劳性能;PVP 修饰石墨烯的掺入对复合改性沥青的低温抗裂性能存在负面影响,但影响不明显.

关键词: 石墨烯改性; 动态剪切流变仪; 多重应力蠕变恢复; 弯曲梁流变仪; 线性振幅扫描

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.02.022

Effect of PVP Modified Graphene on Rheological Properties of SBS Modified Asphalt

JIANG Wentao¹, HAO Peiwen¹, ZHAO Chaozhi², WU Tao², LI Dewen²

(1. Key Laboratory of Road Structure and Materials of Ministry of Transport, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Shaanxi Provincial Communication Construction Group, Xi'an 710075, China)

Abstract: In order to investigate the influence of graphene treated with PVP on the rheological properties of SBS modified asphalt, composite modified asphalt was prepared by adding different amounts of PVP modified graphene to SBS modified asphalt through a high-speed shear. The dynamic shear rheometer (DSR) and temperature sweep and linear amplitude sweep(LAS) tests were used to observe the changes of rheological properties and fatigue resistance of graphene/SBS composite modified asphalt with different contents, combined with bending beam rheometer(BBR) to explore the change of the low-temperature crack resistance of composite modified asphalt. The results show that addition of graphene can effectively improve the deformation resistance and elastic recovery ability of SBS modified asphalt under high temperature conditions and the fatigue resistance of SBS modified asphalt. However, the addition of graphene has a negative impact on the low-temperature crack resistance of the composite modified asphalt, though the impact is not obvious.

Key words: graphene modification; dynamic shear rheology (DSR); multiple stress creep recovery (MSCR); bending beam rheometer(BBR); linear amplitude sweep(LAS)

为使沥青结合料具有更好的路用性能,改性沥青结合料在高等级公路上的应用日益广泛,新型沥

青改性剂的研究也受到广泛关注. 在过去 10 年中,使用纳米材料(例如纳米土、纳米氧化锌、纳米二氧

收稿日期:2020-04-20; 修订日期:2020-06-05

基金项目:陕西省交通运输厅科研项目(15-11K)

第一作者:蒋文韬(1996—),男,四川渠县人,长安大学硕士生. E-mail:983985242@qq.com

通讯作者:郝培文(1967—),男,内蒙古和林人,长安大学教授,博士生导师,博士. E-mail:g102@chd.edu.cn

化钛、纳米二氧化硅)来改性沥青结合料备受关注.研究发现,纳米材料可极大提高沥青结合料的力学性能、抗老化性能和耐久性等^[1-6].相较于其他改性材料,石墨烯作为新型的纳米材料,是一种由 C 原子经 sp² 电子轨道杂化后形成的六角蜂巢单片层状的二维纳米材料,其各种优异性能可极大地改善沥青结合料的高温抗永久变形性能和流变性能^[7-11].杜建政^[12]通过在基质沥青中掺入石墨烯以及 SBS 改性剂对沥青进行改性,研究表明石墨烯与 SBS 通过协同作用能有效改善 SBS 改性沥青的高、低温性能.黄瑾瑜等^[13]通过动态剪切流变仪(DSR)对制备的 SBS-石墨烯复合改性沥青进行温度扫描,结果表明,石墨烯的掺入对 SBS 改性沥青产生了硬化效果;减缓了改性沥青弹性成分的流失,提高了抗车辙能力,可有效改善 SBS 改性沥青的高温性能. Han 等^[14]使用傅里叶变换红外光谱(FTIR)、X 射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)及原子力显微镜(AFM)对沥青样品进行结构表征,结果表明,石墨烯增强了 SBS 在沥青中的亲油性,提高了改性剂在沥青中的分散性.王帆^[15]通过研究发现,聚乙烯吡咯烷酮(PVP)可用 π - π 键和氢键等作用力结合在石墨烯表面,能有效避免石墨烯片层间的团聚作用.

本文将 PVP 修饰石墨烯与 SBS 改性沥青混合搅拌并进行高速剪切,制备得到相应的复合改性沥青,对比研究石墨烯掺量对 SBS 改性沥青常规技术

指标的影响趋势,并利用动态剪切流变仪进行复合改性沥青的温度、频率和线性振幅扫描试验,探索石墨烯对 SBS 改性沥青高温抗车辙、流变性能以及抗疲劳性能的影响规律.

1 试验

1.1 原材料

沥青选用克拉玛依生产的 SBS 改性沥青成品(0.15%¹⁾硫磺稳定剂+5% SBS 改性剂,其中的 SBS 改性剂为中国石化岳阳石油化工产 YH-791,线型结构,苯乙烯与丁二烯的质量分数之比为 30%:70%);石墨烯选用宁波墨西科技有限公司生产的通用型石墨烯粉体,为增强石墨烯与沥青的相容性与分散性,采用聚乙烯吡咯烷酮(PVP)表面活性剂对石墨烯表面进行了处理,其中:石墨烯与 PVP 的质量分数之比为 80%:20%,且石墨烯纯度达 99.8%,无其他杂质,不会影响沥青性能. SBS 改性沥青和 PVP 修饰石墨烯(以下简称石墨烯,GP)的主要技术指标如表 1、2 所示.

表 1 SBS 改性沥青的主要技术指标				
Table 1 Main technical specification of SBS modified asphalt				
Softening point/℃	Penetration (25 ℃)/(0.1 mm)	Ductility (5 ℃)/cm	Density (25 ℃)/(g·cm ⁻³)	Storage stability/℃
67.4	63.4	36.7	0.992	0.9

表 2 PVP 修饰石墨烯(GP)的主要技术指标		
Table 2 Main technical specification of PVP modified graphene		
Specification	Detection typical value	Detection method
Exterior	Gray black powder	Visual inspection
Graphene content(by mass)/%	80.0±1.0	Thermogravimetric analysis test from room temperature to 1 000 ℃
Bulk density/(g·mL ⁻¹)	About 0.10	GB/T 1479.1—2011
Specific surface area/(m ² ·g ⁻¹)	4—10	GB/T 19587—2017
Average layer thickness/nm	2.4	HRTEM observation, statistical average
Slice size/μm	1—20	GB/T 19077.1—2008
Ash content(by mass)/%	≤0.5	GB/T 3780.10—2017
Water content(by mass)/%	≤2	GB/T 26793—2011
Dissolvable metal ion content(by mass)/%	≤0.05	GB/T 24533—2009

1.2 石墨烯-SBS 复合改性沥青的制备

首先,将 SBS 改性沥青加热至流动状态,温度保持在 175 ℃,然后以 0%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5% 的石墨烯掺量(w_{GP})掺入 SBS 改性沥青中;接着,利用高速剪切机以 2 000 r/min 的剪切速率低速剪切 20 min,剪切过程中保持温度在 175 ℃;最后,以

5 000 r/min 的剪切速率高速剪切 90 min,制得石墨烯掺量不同的石墨烯-SBS 复合改性沥青.利用光学显微镜(500 倍)对复合改性沥青的分散性进行观察,结果见图 1.由图 1 可见:SBS 作为分散相分散在沥青连续相中,且分散均匀性较好;石墨烯(粒度为 20 μm)在改性沥青中未出现明显的团聚现象.

1)文中涉及的掺量、纯度等均为质量分数.

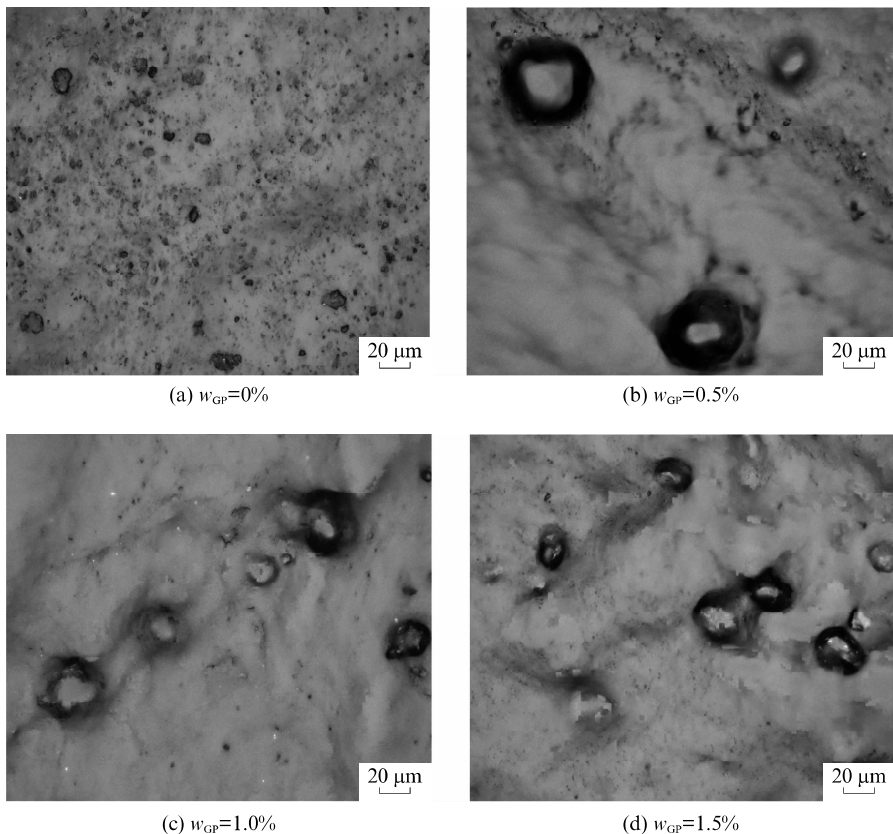


图1 石墨烯-SBS复合改性沥青的光学显微镜照片

Fig. 1 Optical microscope photos of GP-SBS compound modified asphalt with different GP contents

2 试验结果

2.1 常规试验

按照 JTGE20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,对石墨烯-SBS 复合改性沥青进行常规性能指标测试,结果如图 2 所示。由图 2 可得: 25℃下改性沥青的针入度随石墨烯掺量的增加呈现先减小后增大的趋势;软化点则随着石墨烯掺量的增加呈现先升高后降低的趋势;5℃延度随着石墨烯掺量的增加表现出降低的趋势;当石墨烯掺量为 1.5%时,复合改性沥青的针入度和软化点分别达到最小值和最大值。由此说明,在 SBS 改性沥青中掺入石墨烯不仅能提高其稠度,还能起到一定的硬化作用,使 SBS 改性沥青的抗永久变形能力增强,即石墨烯的掺入在一定程度上提高了 SBS 改性沥青的高温性能。但作为纳米材料,石墨烯会在 SBS 改性沥青中阻碍其自由流动,使其低温下的抗塑性变形能力下降,在低温受拉状态下,更容易出现断裂破坏。

2.2 温度扫描试验

Superpave 规范规定用车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 来表征

沥青材料的抗永久变形能力,反映沥青的高温性能。本研究采用应变控制模式,设置应变为 1.25%,采用直径为 25 mm 的平行板夹具,1 000 μm 小间隙,震荡速率为 10.0 rad/s,试验温度区间为 40~82℃。复合改性沥青在不同温度条件下的复数剪切模量 G^* 、车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 、相位角 δ 如图 3~5 所示。

复数剪切模量 G^* 表示沥青在重复剪切变形状态下抵抗所受变形总阻力的能力,而车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 是评价沥青高温性能的一个重要指标,其能够反映沥青抵抗永久变形的能力, $G^*/\sin \delta$ 值越大的沥青结合料因能量耗散而引起的永久变形越小,即车辙因子大的沥青结合料拥有更强的抗车辙能力。由图 3、4 可见:对于 SBS 改性沥青和石墨烯掺量不同的复合改性沥青,两者的 G^* 和 $G^*/\sin \delta$ 值均随着温度的升高而呈现下降趋势,说明温度升高会使 2 种改性沥青的抗变形能力逐渐减弱;掺入石墨烯的复合改性沥青 G^* 和 $G^*/\sin \delta$ 值均高于 SBS 改性沥青,说明石墨烯的掺入使得 SBS 改性沥青的抗变形能力增强,且当石墨烯掺量为 1.5%时,对 SBS 改性沥青的增强效果最大。

相位角 δ 用来表征沥青中黏性与弹性成分的比

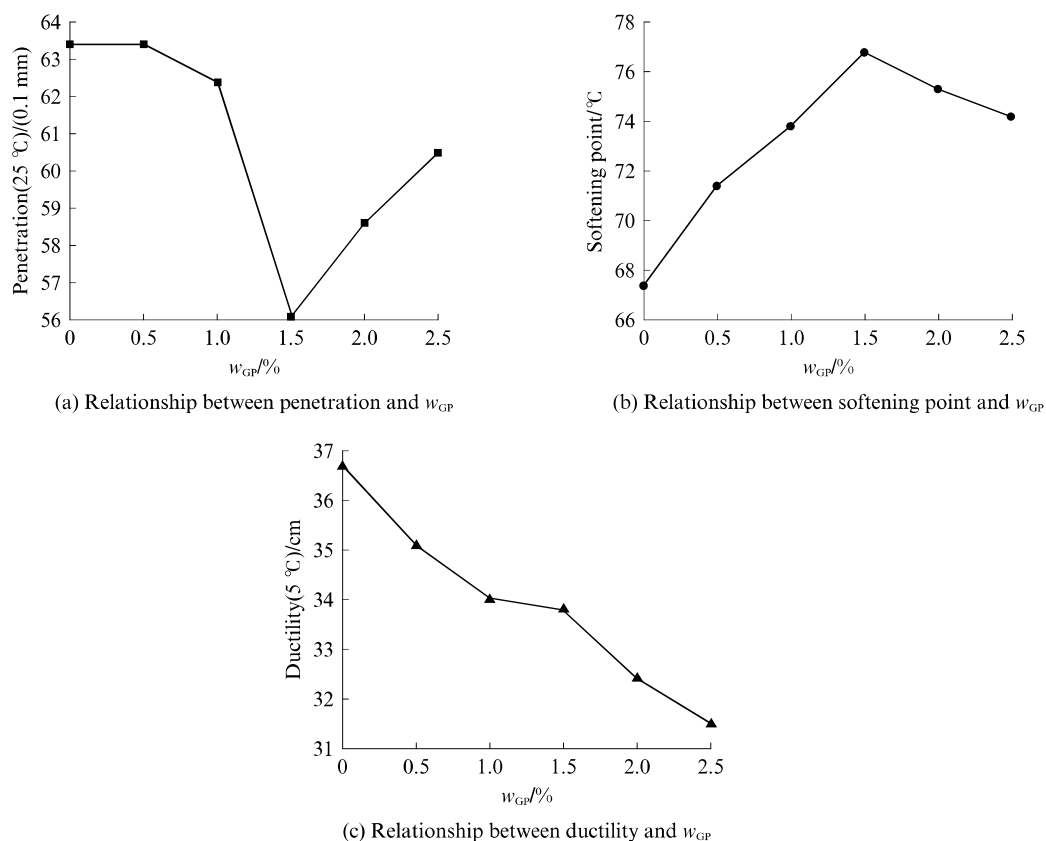
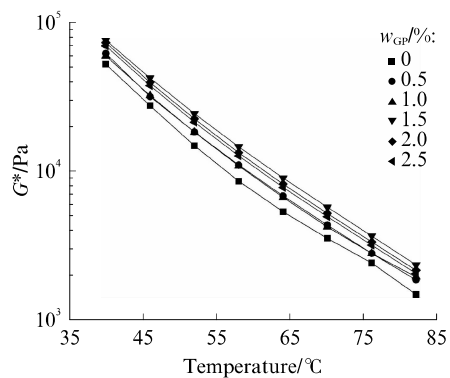
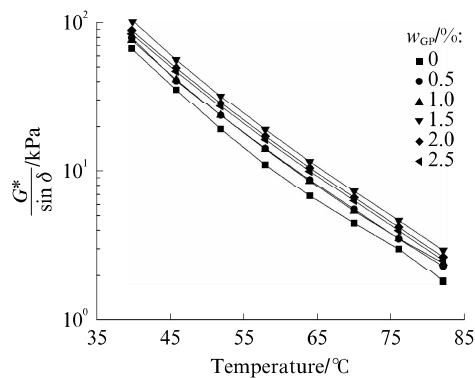


图2 石墨烯-SBS复合改性沥青常规指标试验结果

Fig. 2 Conventional index test results of GP-SBS composite modified asphalt

图3 石墨烯-SBS复合改性沥青复数剪切模量-温度变化图
Fig. 3 Complex shear modulus-temperature change diagram of GP-SBS composite modified asphalt图4 石墨烯-SBS复合改性沥青车辙因子-温度变化图
Fig. 4 Rutting factor-temperature change diagram of GP-SBS composite modified asphalt

例, δ 值越大, 沥青中黏性成分越多, 变形恢复能力越差. 由图 5 可得, 随着温度的升高, 不同石墨烯掺量的复合改性沥青 δ 值呈现上升趋势, 即随着温度的升高, 复合改性沥青中黏性成分增多, 应力-应变滞留效应提高, 抗高温变形能力减弱. 石墨烯的掺入能够有效降低沥青中的黏性成分, 但当石墨烯掺量过大(如 2.0%)时, 多余的石墨烯将随机分布在沥青分子中, 由于石墨烯自身优异的导热性、润滑性, 高温生成的热量将迅速传导至沥青内部, 促使沥青

软化, 从而降低沥青的变形恢复能力. 当石墨烯掺量为 1.5% 时, 复合改性沥青的弹性恢复能力最强.

2.3 多重应力蠕变恢复试验

为了更好地评价复合改性沥青的高温抗车辙性能, 进行了基于 DSR 的多重应力蠕变恢复(MSCR)试验. MSCR 试验利用沥青在外加应力作用下的延迟弹性恢复性能来评价沥青的高温性能. 路面在车轮荷载的重复加、卸载作用下, 变形存在累积效果, 相较于温度扫描试验, MSCR 试验能够准确真实地

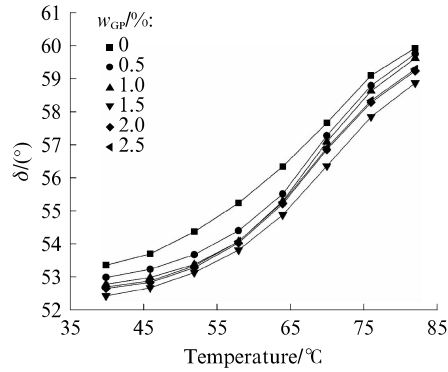


图5 石墨烯-SBS复合改性沥青相位角-温度变化图
Fig. 5 Phase angle-temperature change diagram of GP-SBS composite modified asphalt

模拟沥青路面的应变累积过程,并且MSCR的高温性能试验结果与现场路用性能更为一致。

MSCR试验在动态剪切流变仪上完成,采用应力控制模式,应力分别为100、3 200 Pa,试验温度为64 °C(根据AASHTO T350-14《Standard method of test for multiple stress creep recovery(MSCR) test of asphalt binder using a dynamic shear rheometer(DSR)》分级标准确定)。每个蠕变周期加载1 s,卸载9 s,每种应力状态下重复10个周期,总耗时200 s。通过试验可采集到沥青在不同应力作用下的蠕变和恢复曲线,并据此算出其平均蠕变恢复率 R 和平均不可恢复蠕变柔量 J_{nr} [16-17]。

图6、7展示了复合改性沥青在100、3 200 Pa应力作用下第1周期的蠕变和恢复循环的应变响应。由图6、7可见,在100、3 200 Pa应力作用下,复合改性沥青的最大应变值和累积不可恢复应变基本随着石墨烯掺量的增加而降低,但在石墨烯掺量为1.5%时,其累积不可恢复应变最小。该结果与温度扫描试验结果非常吻合。

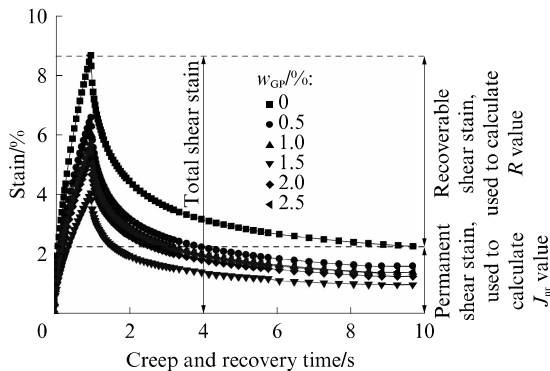


图6 100 Pa应力作用下石墨烯-SBS复合改性沥青第1周期的蠕变

Fig. 6 Creep of GP-SBS composite modified asphalt under the 100 Pa

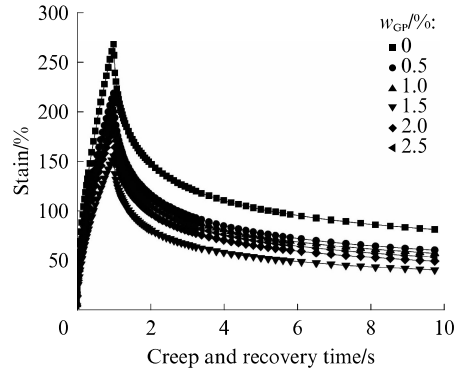


图7 3 200 Pa应力作用下石墨烯-SBS复合改性沥青第1周期的蠕变
Fig. 7 Creep of GP-SBS composite modified asphalt under the 3 200 Pa

根据复合改性沥青在100、3 200 Pa应力作用下10个周期的蠕变和恢复曲线计算得到的平均蠕变恢复率 R 及平均不可恢复蠕变柔量 J_{nr} 如图8、9所示。其中 R 值代表沥青结合料的弹性成分, R 值越大,沥青结合料弹性越好; J_{nr} 值代表高温下沥青结合料的不可恢复蠕变柔量, J_{nr} 值越小,沥青结合料的抗永久变形(车辙)能力越强。由图8、9可见,在100、3 200 Pa应力作用下,随着石墨烯掺量的增加,复合改性沥青的 R 值呈现先增大后减小的趋势,而 J_{nr} 值呈现先降低再升高的趋势。由此表明,石墨烯的掺入改善了SBS改性沥青在不同应力状态下的高温弹性以及稳定性,改善程度则随石墨烯掺量波动,1.5%的石墨烯掺量对SBS改性沥青的高温弹性和稳定性改善效果最显著。其改善机制可能如下:所用SBS改性沥青有较多的轻组分,在热应力或机械应力作用下,胶束的吸附层变薄,轻组分使胶体结构变松,石墨烯的掺入及分散能有效抑制胶体结构的破坏,促进固体网络的交联,从而显著改善沥青结合料的弹性。

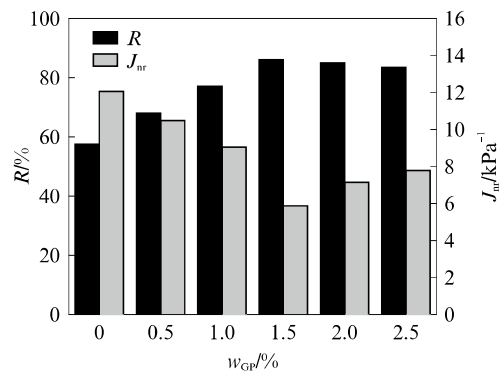


图8 石墨烯-SBS复合改性沥青的平均 R 值和 J_{nr} 值(100 Pa)

Fig. 8 Average R and J_{nr} values of GP-SBS composite modified asphalt with different GP contents(100 Pa)

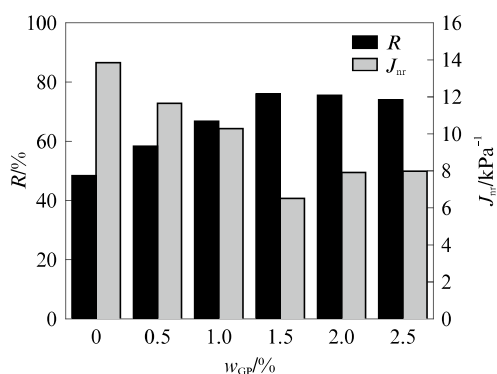
图9 石墨烯-SBS复合改性沥青的平均 R 值和 J_{nr} 值(3 200 Pa)

Fig. 9 Average R and J_{nr} values of GP-SBS composite modified asphalt with different GP contents (3 200 Pa)

2.4 线性振幅扫描试验

SHRP 研究计划采用疲劳因子 $G^* \sin \delta$ 作为沥青抗疲劳性能指标,其力学意义为动态剪切模量的黏性成分直接决定了耗散能的大小.由于该指标是在线黏弹性范围内测得,并不能很好地表征沥青的疲劳损伤特性以及抗疲劳荷载的能力,且其与沥青混合料的相关性极小^[18].

根据 AASHTO TP-101《Standard method of test for estimating damage tolerance of asphalt binders using the linear amplitude sweep》进行线性振幅扫描(LAS)试验.试验利用动态剪切流变仪进行,试验夹具为 8 mm 的上下平行板,板间距为 2 mm,试验温度为 25 ℃.试验时,首先在 0.1% 的恒定应变下对试样进行频率扫描,扫描频率分别为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、2.0、4.0、8.0、10.0、20.0、30.0 Hz,而后采用控制应变的加载方式线性振幅扫描 5 min.

LAS 试验结果如图 10 所示.由图 10 可见:石墨烯的掺入能够提高 SBS 改性沥青的疲劳寿命 N_f ,并降低损伤率;随着石墨烯掺量的增加,复合改性沥青的疲劳寿命呈现先增大后减小的趋势.呈现此趋势的原因可能是:在制备 SBS 改性沥青时,因聚苯乙烯(PS 相)和聚丁二烯(PB 相)均与基质沥青中的分子发生了较为充分的化学反应且形成了较为稳定的结构(如图 1 所示),基质沥青中反应性化学官能团已被大量消耗,因而少量的石墨烯难以与 SBS 改性沥青发生反应,但由于石墨烯独特的层状结构,在其与 SBS 改性沥青共混过程中可以形成典型的“插层”结构(如图 11 所示,加入石墨烯后,复合改性沥青出现了 $2\theta=26.5^\circ$ 的石墨烯特征峰,层间距 d 为 0.336 4 nm),使得石墨烯与 SBS 改性沥青形

成的网络结构更加完整和坚韧,从而能够提高沥青结合料的疲劳寿命;随着石墨烯掺量继续增加,过量的石墨烯由于分散不均匀而造成团聚,引起局部应力集中,从而破坏聚合物的网状结构,进而降低复合改性沥青的抗疲劳性能.当石墨烯掺量为 1.5% 时,石墨烯对 SBS 改性沥青的抗疲劳性能改善效果最强,即石墨烯最佳掺量为 1.5%.

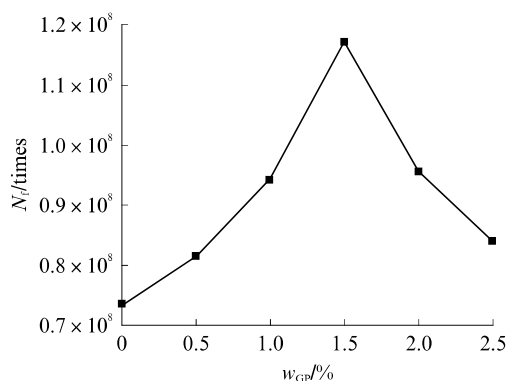


图10 石墨烯-SBS复合改性沥青的疲劳寿命(25 ℃)

Fig. 10 Fatigue life of GP-SBS composite modified asphalt with different GP contents at 25 ℃

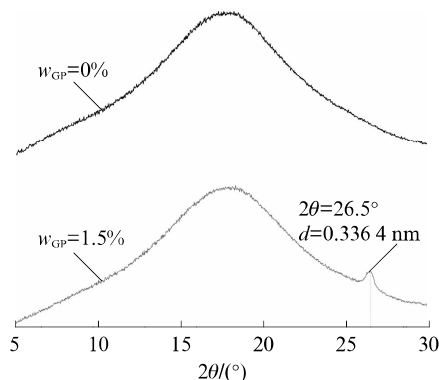


图11 石墨烯掺量为0%和1.5%的复合改性沥青 XRD 图谱

Fig. 11 XRD patterns of composite modified asphalt with 0% and 1.5% GP contents

2.5 弯曲梁流变仪试验

根据 AASHTO T313-12《Standard method of test for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR)》方法进行弯曲蠕变劲度试验(BBR 试验),利用弯曲梁流变仪自带软件加载,在一定温度下以恒定应力持续加载 240 s.试验过程中一般给出沥青在第 8.0、15.0、30.0、60.0、120.0、240.0 s 的劲度模量 S 及蠕变速率 m ,通过这 2 个指标来评价沥青的低温性能.通常在实际应用中取 60.0 s 的劲度模量 S 和蠕变速率 m 进行评价.

本研究测量-12、-18 ℃下复合改性沥青的劲

度模量 S 和蠕变速率 m , 得到复合改性沥青 S 值和 m 值随石墨烯掺量的变化趋势, 如图 12、13 所示。

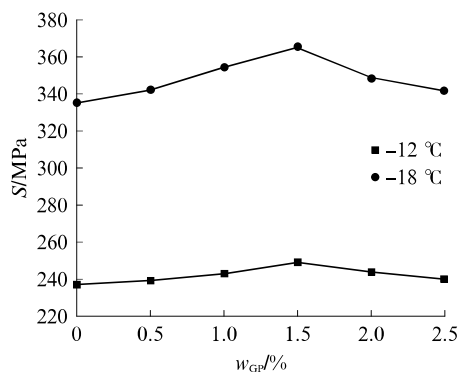


图 12 石墨烯-SBS 复合改性沥青的劲度模量
Fig. 12 Stiffness modulus of GP-SBS composite modified asphalt with different GP contents

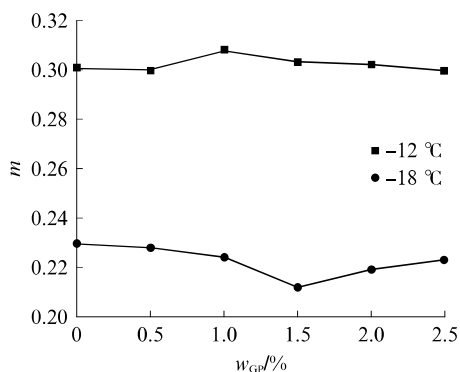


图 13 石墨烯-SBS 复合改性沥青的蠕变速率
Fig. 13 Creep rate of GP-SBS composite modified asphalt with different GP contents

劲度模量 S 是沥青流变性能的重要指标, 表征沥青抵抗变形的能力; 蠕变速率 m 则反映沥青劲度随时间的敏感性及应力松弛能力。 S 值的降低以及 m 值的增加都对应于沥青路面低温抗开裂性能的增强。由图 12、13 可见: $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下复合改性沥青的 S 值较 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下大, 而 m 值表现相反, 且在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 复合改性沥青的抗裂性能对石墨烯掺量的敏感性高于 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时; 在 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下, 复合改性沥青的 S 值虽随石墨烯掺量的增加有所增大, 但变化幅度可忽略不计, m 值随石墨烯掺量增加而变化的趋势并不明显 (均满足 $S < 300\text{ MPa}$, $m > 0.30$); 在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下, 复合改性沥青的 S 值随石墨烯掺量的增加呈现先增加后减小的趋势, 其中石墨烯掺量为 1.5% 时达到最大值, 而 m 值呈现相反的趋势, 但变化幅度都不大, 表明随着石墨烯的掺入, 改性沥青的低温抗裂性虽有所降低, 但过量的石墨烯可能会对改性沥青起到润滑作用, 从而促进沥青的低温应力

松弛。综合 2 种温度下的力学响应分析可知, 石墨烯的掺入不能显著改善 SBS 改性沥青的韧性和低温抗裂性能。

3 结论

(1) 通过温度扫描试验发现, 石墨烯的掺入能够显著改善 SBS 改性沥青在高温条件下的抗变形能力及弹性恢复能力; 在不同石墨烯掺量下, 复合改性沥青的 $G^*/\sin \delta$ 均随着温度的升高而降低, 而相位角 δ 先减小后增大, 当石墨烯掺量为 1.5% 时, 对 SBS 改性沥青抗车辙性能及弹性恢复能力的改善效果最好。

(2) 多重应力蠕变恢复试验表明, 相较于 SBS 改性沥青, 石墨烯-SBS 复合改性沥青具有较高的蠕变恢复率和较低的不可恢复蠕变柔量, 说明石墨烯的掺入促进了更加坚韧的网络结构生成, 形成的复合结构直接改善了 SBS 改性沥青的抗高温性能, 且在石墨烯掺量为 1.5% 时, 对 SBS 改性沥青的弹性及稳定性改善效果最好。

(3) 线性振幅扫描试验表明, 石墨烯的掺入能够提高 SBS 改性沥青的抗疲劳性能, 当石墨烯掺量为 1.5% 时, 石墨烯对 SBS 改性沥青的改善效果最好。

(4) 弯曲梁流变仪试验表明, 石墨烯的掺入会使 SBS 改性沥青的低温抗裂性能降低, 但整体降低幅度不大。

参考文献:

- [1] 张明祥. 纳米氧化锌改性沥青及其抗老化性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
ZHANG Mingxiang. Nanometer zinc oxide modified asphalt and its anti-aging properties research[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. (in Chinese)
- [2] YAO H, YOU Z, LI L, et al. Rheological properties and chemical analysis of nanoclay and carbon microfiber modified asphalt with Fourier transform infrared spectroscopy[J]. Construction and Building Materials, 2013, 38: 327-337.
- [3] ZHANG H L, SU M M, ZHAO S F, et al. High and low temperature properties of nano-particles/polymer modified asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2016, 114: 323-332.
- [4] 朱俊材, 李泉, 刘克非. 氧化石墨烯改性沥青结合料的性能[J]. 中国粉体技术, 2018, 24(4): 70-76.
ZHU Juncai, LI Quan, LIU Kefei. Properties of graphene oxide modified asphalt binder[J]. China Powder Science and Technology, 2018, 24(4): 70-76. (in Chinese)
- [5] 郭贺源, 孟勇军, 徐锐光, 等. 石墨烯橡胶复合改性沥青流变性能及微观性能[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(5): 1246-1251.
GUO Heyuan, MENG Yongjun, XU Ruiguang, et al. The

- rheological and microscopic properties of graphene rubber composite modified asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(5): 1246-1251. (in Chinese)
- [6] 侯林杰. 纳米石墨烯改性沥青流变性能研究[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(4): 133-137.
- HOU Linjie. Study on rheological properties of nano-graphene modified asphalt[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2018, 35(4): 133-137. (in Chinese)
- [7] 陈凤娥, 杨洋, 李国鑫, 等. 石墨烯改性沥青物理性能试验研究[J]. 西部交通科技, 2019(5): 5-8.
- CHEN Feng'e, YANG Yang, LI Guoxin, et al. Experimental study on physical properties of graphene modified asphalt[J]. Western China Communication Science & Technology, 2019(5): 5-8. (in Chinese)
- [8] WEITZ R T, YACOBY A. Nanomaterials: Graphene rests easy[J]. Nature Nanotechnology, 2010, 5(10): 699-700.
- [9] DIMITRAKAKIS G K, TYLIANAKIS E, FROUDAKIS G E. Pillared graphene: A new 3-D network nanostructure for enhanced hydrogen storage[J]. Nano Letters, 2008, 8(10): 3166-3170.
- [10] ZHU J C, ZHANG K, LIU K F, et al. Performance of hot and warm mix asphalt mixtures enhanced by nano-sized graphene oxide[J]. Construction and Building Materials, 2019, 217: 273-282.
- [11] YAO H, DAI Q L, YOU Z P, et al. Rheological properties, low-temperature cracking resistance, and optical performance of exfoliated graphite nanoplatelets modified asphalt binder[J]. Construction and Building Materials, 2016, 113: 988-996.
- [12] 杜建政. 石墨烯-SBS 改性沥青的性能[J]. 交通世界, 2015(4): 144-145, 141.
- DU Jianzheng. Performance of graphene-SBS modified asphalt[J]. Transpo Word, 2015(4): 144-145, 141. (in Chinese)
- [13] 黄瑾瑜, 叶群山. SBS-石墨烯复合改性沥青流变性能研究[J]. 交通科技, 2018(1): 131-133.
- HUANG Jinyu, YE Qunshan. Experimental study on rheological properties of SBS-graphene composite modified asphalt[J]. Transportation Science & Technology, 2018(1): 131-133. (in Chinese)
- [14] HAN M Z, LI J, MUHAMMAD Y, et al. Studies on the secondary modification of SBS modified asphalt by the application of octadecyl amine grafted graphene nanoplatelets as modifier[J]. Diamond and Related Materials, 2018, 89: 140-150.
- [15] 王帆. 石墨烯功能化修饰及其电化学应用[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2013.
- WANG Fan. Functionalization of graphene with polymer and its application in fabrication electrochemical sensor[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2013. (in Chinese)
- [16] 雷俊安, 郑南翔, 许新权, 等. 温拌沥青高温流变性能研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(4): 904-911.
- LEI Jun'an, ZHENG Nanxiang, XU Xinquan, et al. Study on high temperature rheological properties of warm mixed asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4): 904-911. (in Chinese)
- [17] 唐乃鹏, 黄卫东. 基于 MSCR 试验的 SBS 改性沥青高温性能评价与分级[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(4): 665-671.
- TANG Naipeng, HAUNG Weidong. High temperature performance evaluation and grading of SBS modified asphalt based on multiple stress creep recovery test[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(4): 665-671. (in Chinese)
- [18] 周水文, 时敬涛, 张蓉, 等. 基于线性振幅扫描试验评价沥青疲劳性能研究[J]. 石油沥青, 2018, 32(2): 27-33.
- ZHOU Shuiwen, SHI Jingtao, ZHANG Rong, et al. Research on the fatigue property of asphalt based on linear amplitude sweep test[J]. Petroleum Asphalt, 2018, 32(2): 27-33. (in Chinese)