

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.01.002

氧化石墨烯复配 SBS 改性沥青物理流变性能研究

周焕云, 张磊

(东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要:近年来,随着纳米科技和材料科学的飞速发展,新兴的碳族纳米材料氧化石墨烯(GO)由于具备卓越的机械性能,已经被广泛应用于各种有机高分子和无机胶凝材料中以制备复合材料来增强基体,其无可比拟的结构特性和尺寸效应引起了道路研究人员的极大兴趣。氧化石墨烯在道路工程领域尤其是沥青路面中越发得到重视,然而目前大部分的研究只是局限于氧化石墨烯单一改性基质沥青,且改性效果并不显著。通过高速剪切的方式配制了氧化石墨烯复配SBS改性沥青(GO/SBS)。借助动态剪切流变仪(DSR)、多重应力蠕变恢复(MSCR)、弯曲梁流变仪(BBR)等技术手段研究了氧化石墨烯复配SBS改性沥青的动态流变行为。使用针入度、延度、软化点等基本指标对复配改性沥青的物理技术性能进行了评估。试验结果表明:氧化石墨烯的引入可以明显提升SBS改性沥青的高温稳定性和动态力学响应;适量的氧化石墨烯可以改善SBS改性沥青的低温开裂抗性,其中氧化石墨烯用量为0.6%时,氧化石墨烯复配SBS改性沥青的延度、软化点分别提高了26%和8.3%,针入度却略微有所降低;氧化石墨烯复配SBS改性沥青的高温抗车辙性能、低温抗开裂性能均较SBS单一改性沥青有所提升,这表明氧化石墨烯复配SBS改性沥青具有一定的应用前景。

关键词:道路工程;流变性能;试验研究;DSR;MSCR;BBR;SBS改性沥青

中图分类号:U414.1

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2021)01-0010-09

Study on Physical and Rheological Properties of Graphene Oxide Compounded SBS Modified Asphalt

ZHOU Huan-yun, ZHANG Lei

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: In recent years, with the rapid development of nanotechnology and material science, the emerging carbon family nanomaterial graphene oxide (GO) has been widely used in various organic polymers and inorganic cementitious materials to prepare composite materials for strengthening the matrix due to its excellent mechanical properties. Its incomparable structural characteristics and size effect have aroused great interest of road researchers. GO has been paid more and more attention in the field of road engineering, especially in asphalt pavements. However, most of the current researches are limited to GO single modified base asphalt, and the modification effect is not significant. The GO compound SBS modified asphalt is prepared through high-speed shearing. With the help of dynamic shear rheometer (DSR), multiple stress creep recovery (MSCR), bending beam rheometer (BBR) and other technologies, the dynamic rheological behavior of GO compound SBS modified asphalt is studied. The physical and technical performance of the compound modified asphalt is evaluated by using basic indicators such as penetration, ductility and softening point. The experimental result shows that (1) the introduction of GO can significantly improve the high

收稿日期:2020-05-13

基金项目:国家自然科学基金项目(6550140013)

作者简介:周焕云(1976-),女,江苏南京人,硕士.(yunmoxi@126.com)

temperature stability and the dynamic mechanical response of SBS modified asphalt; (2) the appropriate amount of GO can improve the low temperature cracking resistance of SBS modified asphalt, the ductility and the softening point of GO composite SBS modified asphalt are increased by 26% and 8.3% respectively when the amount of GO is 0.6%, but the penetration is slightly reduced; (3) GO compound SBS (GO/SBS) modified asphalt has better high-temperature rutting resistance and low-temperature anti-cracking performance than SBS single modified asphalt, which shows that GO compound SBS modified asphalt has certain application prospect.

Key words: road engineering; rheological property; experimental study; DSR; MSCR; BBR; SBS modified asphalt

0 引言

沥青的聚合物改性, 如 SBS 改性沥青在满足路面行业需求方面已经显示出巨大的潜力^[1], 然而使用 SBS 改性沥青的路面仍存在问题, 例如, 在繁重的交通荷载和恶劣的气候条件重复作用下, SBS 改性沥青路面性能没有得到进一步改善, 并且改性方法较为单一, 路面容易出现早期破坏和性能下降, 甚至无法满足公路技术要求^[2-13]。我国复杂的交通组成和气候类型对道路性能提出了更高的要求。随着纳米科技的发展, 一些新型沥青改性剂引起了学者的关注^[14-16]。在过去的 10 a 中, 由于纳米材料的自身特性, 使用纳米材料 (纳米黏土、纳米 ZnO、纳米 SiO₂) 来改性沥青已经有了初步研究成果^[16]。然而, 上述纳米材料对沥青的改性效果不尽相同。与上述其他纳米材料相比, 氧化石墨烯 (GO) 具有独特的准二维分层结构, 层间距为 0.7 ~ 1.2 nm。随着层间间距的增加, 层间的范德华力减小, GO 在经过适当的超声波冲击处理后很容易地分散在水溶液或有机溶剂中, 从而形成均匀的单层 GO 悬浮液^[17-20]。另外, GO 的表面含有大量的极性含氧基团, 例如羧基、羟基、环氧基、酯基^[21-23]。这些官能团使 GO 具有反应活性, 并与许多聚合物基质相容^[24]。基于此, 考虑联合使用 GO 和 SBS 复合改性沥青结合料, 以实现沥青胶结料综合技术性能的提升^[25]。

1 材料与试验

1.1 试验材料

1.1.1 SBS 改性沥青

SBS 改性沥青由 SK-70 基质沥青和 SBSYH-791 改性剂 (掺量为 5.5%, 基于先前的研究结果发现, 5.5% SBSYH-791 改性剂可以实现高温性能的最优化, 同时为了确保 GO/SBS 复合改性沥青低温

开裂抗性的稳定, 故适当提高 SBS 聚合物掺量到 5.5%) 在实验室制备, 其技术指标见表 1 和表 2。

表 1 SK-70 基质沥青技术指标

Tab. 1 Technical indicators of SK-70 matrix asphalt

测试项目	试验结果	技术要求
针入度 (100 g, 5 s, 25 °C)/(0.1 mm)	66.7	60 ~ 80
软化点 (环球法)/°C	48.7	≥46
延度 (50 mm/min, 15 °C)/cm	114.0	>100
动力黏度 (60 °C)/(Pa · s)	197.0	≥180

表 2 SBS 改性沥青技术指标

Tab. 2 Technical indicators of SBS modified asphalt

测试项目	试验结果	技术要求
针入度 (100 g, 5 s, 25 °C)/(0.1 mm)	58.6	40 ~ 60
软化点 (环球法)/°C	81.5	≥60
延度 (50 mm/min, 15 °C)/cm	25.5	≥20
运动黏度 (135 °C)/(Pa · s)	1.24	≤3

1.1.2 氧化石墨烯 (GO)

氧化石墨烯粉体的相关技术指标见表 3。

表 3 氧化石墨烯技术指标

Tab. 3 Technical indicators of graphene oxide

项目	检测典型值
外观	黑色粉末
纯度/%	98.8
松装密度/(g · cm ⁻³)	0.10
比表面积/(m ² · g ⁻¹)	110.0
片层平均厚度/nm	2.1
片层尺寸/μm	15

1.2 试验方法

1.2.1 氧化石墨烯复配 SBS (GO/SBS) 改性沥青的制备

首先, 将 400 g SK-70 基质沥青加热到 145 °C 恒温 2 h, 以去除沥青中的水分, 然后将干燥洁净的 22 g SBSYH791 (改性剂)、质量分数分别为 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, 1.0% 的 GO (GO 占基质沥

青质量的比例)和已经熔融的SK-70基质沥青同时加入到金属容器,开启高速剪切机,并以5 000 r/min的速度在170 ℃下剪切30 min。高速剪切阶段完成后,将沥青混合物在170 ℃继续低速(1 000 r/min)剪切30 min,同时添加0.5 g稳定剂。在低速剪切结束后,将混合物静置于170 ℃烘箱1 h,最终产物即为GO/SBS改性沥青。用于测试复合改性沥青性能的样品每个掺量下均测试3次,最终结果取3次试验的平均值。

1.2.2 物理性能测试

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)^[26](以下简称《规程》)的有关测试步骤,分别对GO/SBS改性沥青的针入度(25 ℃)、软化点(R&B)、延度(5 ℃)、存储稳定性进行了测试。

1.2.3 流变性能测试

根据SHRP计划,对不同用量的GO/SBS改性沥青用动态剪切流变仪(DSR)进行动态流变行为测试,测试中使用的仪器是高精度TA-HR-1。借助DSR平台执行温度扫描程序测试,试验温度为46~80 ℃,间隔6 ℃;测试模具尺寸为 $\phi 25\text{ mm} \times 1\text{ mm}$;采用控制应变加载模式,应变水平为1%;加载频率为10 rad/s^[18]。

1.2.4 多重应力蠕变恢复测试

使用DSR在64 ℃进行多重应力蠕变恢复测试,研究不同掺量GO在两种应力水平(0.1 kPa和3.2 kPa)下对SBS改性沥青高温稳定性的影响,每种应力均重复测量10次,每次循环10 s(蠕变1 s,恢复9 s),总耗时200 s。测试样品直径25 mm,平行板间隔1 mm^[20]。

1.2.5 低温弯曲流变测试

采用该测试评估GO/SBS改性沥青低温蠕变性能^[1]。首先将沥青加热至流体状态,倒入梁模中,并冷却至室温。然后将沥青置于-5 ℃的无水乙醇中冷却15 min并脱模。紧接着将样品浸泡在指定温度的无水乙醇浴中60 min。记录60 s时沥青样品的蠕变刚度 S 和蠕变速率 m 。

1.2.6 微观形貌表征

采用高分辨率光学显微镜(Leica TOM/DM 4 000)观察GO在SBS改性沥青基体中的分布情况。

2 试验结果与讨论

2.1 氧化石墨烯复配SBS改性沥青的物理性能

针入度、延度、软化点、存储稳定性测试均按

照《规程》的有关规定进行。GO/SBS改性沥青的有关测试结果见图1。

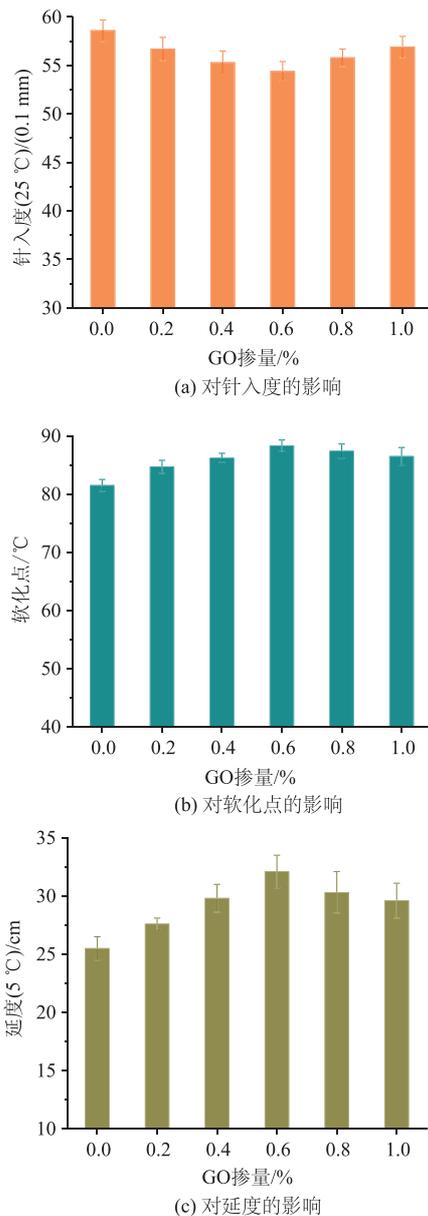


图1 GO含量对GO/SBS改性沥青3大指标的影响

Fig. 1 Influence of GO content on 3 indicators of GO/SBS modified asphalt

如图1(a)所示,GO/SBS复合改性沥青针入度随着GO含量的增加呈现出先降低后上升的变化趋势,当GO用量为0.6%时,针入度最小为54.4(0.1 mm)(降低了约7.2%)。与之相反,软化点则随着GO含量的增加而增大(图1(b)),其中GO用量为0.6%时获得最大值88.3 ℃(增加了近8.3%)。延度与针入度变化类似(图1(c)),为先增加后减小,在GO用量为0.6%时,延度值最大为32.1 cm(提高了约26%)。这种趋势可能是由于GO

掺量超过一定限值以后, 过量的 GO 在 SBS 改性沥青中形成了滑动层, 促进了沥青分子的运动, 从而使得延度和软化点回落, 针入度上升^[18]。GO 的加入可以在一定程度上改善 SBS 改性沥青的可塑性、高温、低温和黏度等特性, 但是需要控制 GO 的最大掺量, 试验数据表明过量 GO 可能会削弱其与沥青分子之间的联接强度。

GO/SBS 改性沥青离析测试结果汇总于表 4。显然, 试验前后 GO/SBS 改性沥青的软化点差最高可达 2.4 °C, 说明复合改性沥青产生了离析, 但是仍然满足工程技术要求 (软化点差不超过 2.5 °C)。GO/SBS 改性沥青出现了一定程度的离析也说明了过量的 GO 对沥青分子的凝聚作用较为脆弱^[27]。

表 4 GO/SBS 改性沥青离析测试结果

Tab 4 Separation test result of GO/SBS modified asphalt

改性剂类型	上层软化点/°C	下层软化点/°C	软化点差值/°C
5.5% SBS	80.5	80.0	0.5
0.2% GO + 5.5% SBS	83.2	82.3	0.9
0.4% GO + 5.5% SBS	85.4	84.1	1.3
0.6% GO + 5.5% SBS	87.1	85.4	1.7
0.8% GO + 5.5% SBS	86.2	84.2	2.0
1.0% GO + 5.5% SBS	85.3	82.9	2.4

2.2 氧化石墨烯复配 SBS 改性沥青的流变性能

目前, SHRP 方法主要用于测试和评估改性沥青的高温车辙、中温疲劳、低温断裂等性能, 基于 DSR 平台评价沥青的黏弹特性已经得到行业的公认。在一定温度范围内, 沥青试样将经受 DSR 施加的可变振荡剪切应力, 从而产生一定的变形。同样, 产生形变的应力与沥青的弹性和黏度密切相关^[25]。通过 DSR 内置计算软件可以自动获取表征沥青流变的特性参数: 复数剪切模量 G^* 、相位角 δ 和车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 。通过温度扫描 (46 ~ 80 °C) 研究不同剂量的 GO 对复配改性沥青流变行为的影响规律, 试验结果见图 2 ~ 图 3。

复数模量 G^* 能够表征沥青胶结料在线黏弹性范围内抵抗重复剪切变形的能力。一般而言, 复数剪切模量 G^* 越大, 沥青的弹性组分占比越多, 抵御变形能力就越强^[27]。如图 2 所示, 无论 GO 用量多少, GO/SBS 改性沥青均表现为随着温度上升, 复数剪切模量逐步下降; 在任意温度下, GO 含量增加, 对应的复合改性沥青的模量值 G^* 也逐步提高, 特别是在测试温度为 64 °C、GO 用量达到 1.0% 时, 其复数剪切模量已经跃升至 10.681 kPa, 与纯 SBS 改性沥青

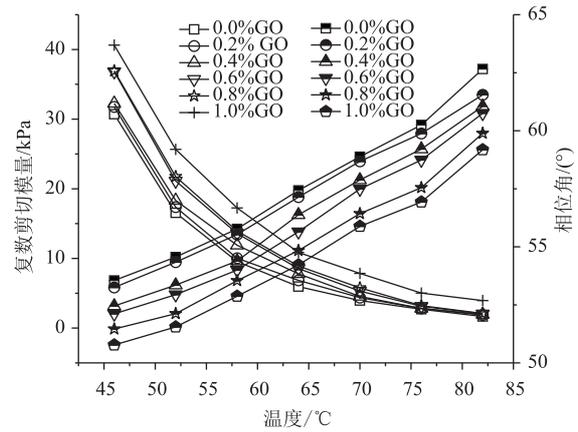


图 2 温度对 GO/SBS 改性沥青流变参数的影响

Fig. 2 Influence of temperature on rheological parameters of GO/SBS modified asphalt

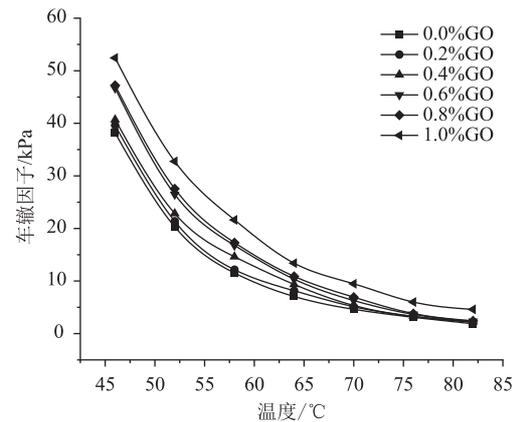


图 3 GO/SBS 改性沥青车辙因子随温度变化

Fig. 3 Rutting factor of GO/SBS modified asphalt varying with temperature

相比, 提升幅度接近 2 倍, 说明 GO 的加入能够改善 SBS 改性沥青的高温抗车辙特性。

相位角 δ 一般用于描述结合料中黏性组分所占的比重, δ 越大意味着黏性组分越多, 变形恢复速率越小^[22]。如图 2 所示, 由于温度上升, 各种复配改性沥青的 δ 值均呈现出增大的趋势, 即高温使得沥青分子之间的约束力减小, 沥青分子更加容易流动, 其中黏性成分逐渐增多^[25]。随着 GO 的逐渐引入, 复合改性沥青的相位角出现了一定程度的降低, 且 GO 用量越高, 相位角的减小程度就越大, 这说明了 GO 能够有效降低 SBS 改性沥青中的黏性成分, 且在一定程度上抑制沥青分子的高温流动, 减缓 SBS 改性沥青的应力-应变滞留效应, 进而提高其弹性响应。

车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 常用于评估沥青结合料抵御高温塑性变形的能力。 $G^*/\sin \delta$ 越大, 沥青在高温

条件下产生的永久变形越小、抗高温车辙效果越好^[20]。从图3可知, $G^*/\sin \delta$ 均随测试温度上升而减小, 说明高温会削弱沥青的抗变形能力。同一温度下, 随着 GO 的用量逐渐增加, SBS 改性沥青的 $G^*/\sin \delta$ 逐渐增大, 表明 GO 能够提高沥青的抗塑性变形能力, 且在测试温度为 64 °C、GO 掺量为 1% 时, 与未掺加 GO 沥青相比, 车辙因子增加了 89.6%。GO 自身独特的力学属性使得 SBS 改性沥青中的网络结构进一步得到增强, 宏观表现为 GO/SBS 改性沥青的流变性能得以明显提升, 极大地促进了 SBS 改性沥青的高温稳定性^[27]。

2.3 氧化石墨烯复配 SBS 改性沥青的高温稳定性

已有研究表明, 多重应力蠕变恢复 (MSCR) 试验与流变性能试验相比, MSCR 试验获取的高温性能测试结果与现场路面性能更加吻合, 尤其适用于聚合物改性沥青高温抗塑性变形评估^[21]。

在 MSCR 试验中, 通常借助变形恢复率 R 和不可恢复蠕变柔量 J_{ir} 来评价沥青的高温性能。 R 表示沥青中的弹性组分, R 值越大, 沥青的弹性越好; J_{ir} 表示沥青在高温下无法恢复的蠕变变形, J_{ir} 越小, 抗塑性变形的能力越强^[25]。

图4(a)和图4(b)分别为在 0.1 kPa 和 3.2 kPa 应力水平下首次循环周期的蠕变响应。在不同应力水平下, GO 的加入能够降低 SBS 改性沥青的最大应变和最终塑性变形, GO 掺量越大, 其对应的最大应变值和松弛阶段结束时的应变值均表现为最小, 说明一定用量的 GO 能够抑制 SBS 改性沥青不可恢复变形的产生。这与 DSR 测试中的 $G^*/\sin \delta$ 结果具有很好的一致性。图5(a)和图5(b)分别揭示了在 0.1 kPa 和 3.2 kPa 应力水平下 R 和 J_{ir} 随 GO 用量的增加而变化的趋势, R 值随 GO 用量的增大表现为先快速增长后趋向平稳的态势; J_{ir} 则与之相反, 先急剧下降后趋于平稳。在低应力水平下 (0.1 kPa), 掺加 GO 的 SBS 改性沥青的 R 值明显高于同等含量下高应力水平 (3.2 kPa) 的 R 值, 即低应力对 GO/SBS 改性沥青的变形恢复更加有利。当应力水平提高到 3.2 kPa 时, 随着 GO 用量的提高, 其变形恢复能力逐步增强, J_{ir} 也相应地降低, 即 GO/SBS 改性沥青中弹性比例增多, 黏性成分减少, 进而提高了沥青的高温抗变形能力^[22]。GO 能够增强 SBS 改性沥青的抗高温性能可能有以下几个原因: GO 本身具有优异的力学性能, 其弹性模量高达 2.8 GPa, 加入到 SBS 网络中将进一步增强 GO/SBS 复合

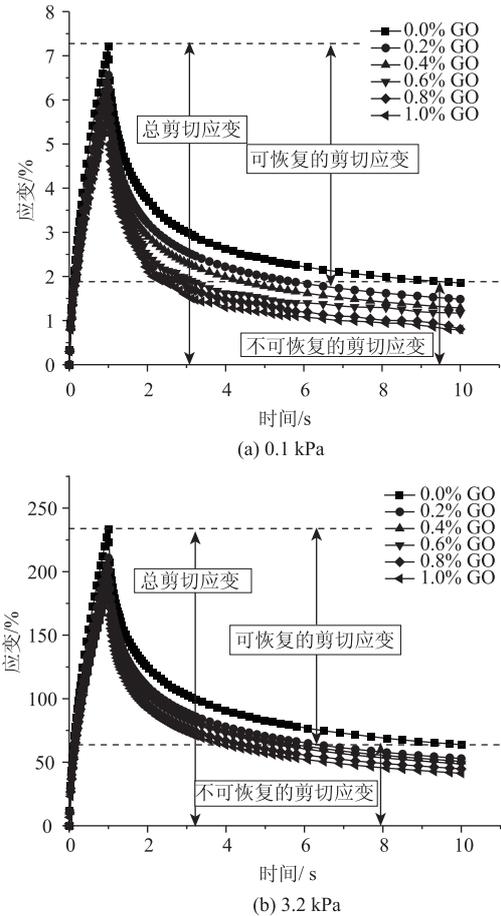


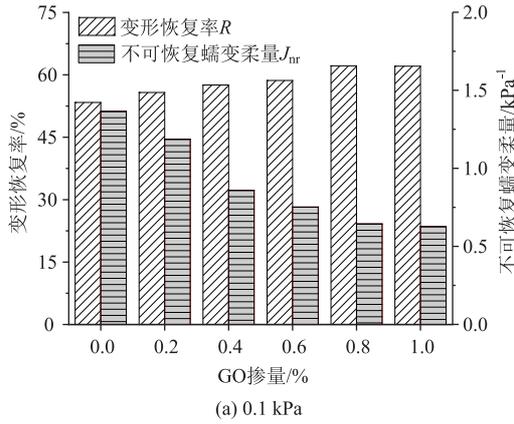
图4 不同应力水平下 GO/SBS 改性沥青首次循环周期蠕变
Fig. 4 Creeps of GO/SBS modified asphalt in the first cycle under different stress levels

网络结构的强度与韧性^[16]; GO 表面富含活性官能团, 这些官能团能够与沥青分子中的极性/非极性成分发生化学反应, 形成牢固的化学键^[18,21], 在高温高应力作用下, 这种化学结合作用与 SBS 网络协同增强沥青的高温抗车辙性能。

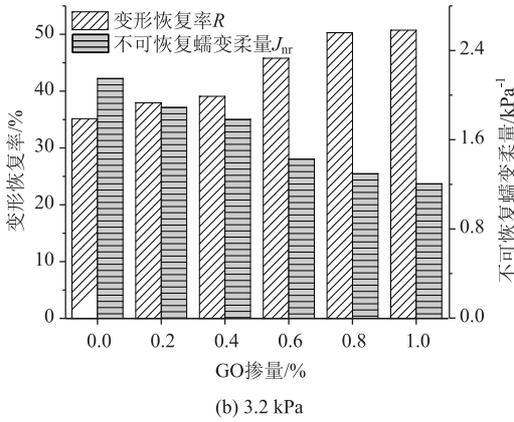
2.4 氧化石墨烯复配 SBS 改性沥青的低温开裂性能

蠕变刚度 S 表示沥青抵抗低温变形的能力, S 值越小说明沥青结合料在低温条件下开裂的风险越低; 蠕变速率 m 表征沥青的劲度模量随蠕变时间的变化快慢程度, 即反映沥青结合料的应力松弛能力, m 值越大, 沥青的应力松弛能力越强, 沥青产生开裂破坏的概率就越小^[22]。

使用弯曲梁流变仪 (BBR) 进行 GO/SBS 改性沥青的低温开裂性能测试, 结果如图6(a)~(b)所示。在 -30 °C 下, GO/SBS 改性沥青的 S 普遍高于 -24 °C 的值, 而 m 值刚好与之相反。当温度为 -24 °C 时, 各个掺量的 GO 复合改性沥青的 S 和 m 值



(a) 0.1 kPa

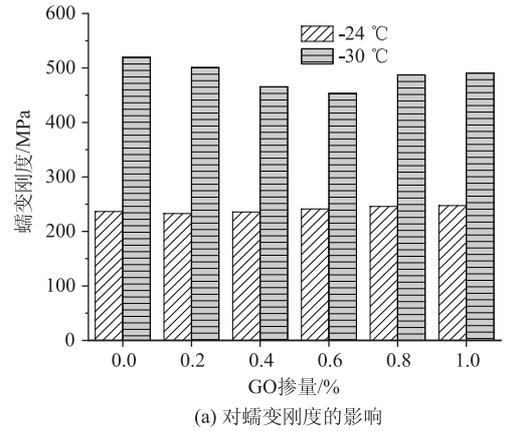


(b) 3.2 kPa

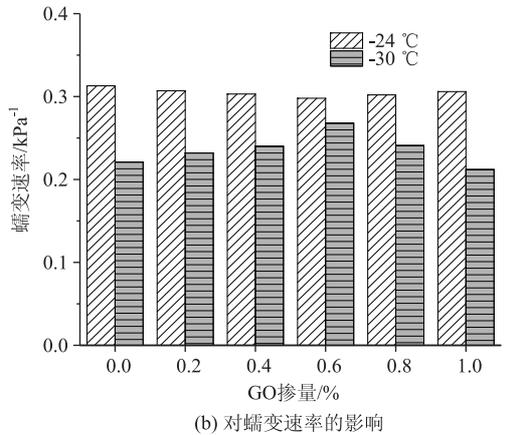
图 5 不同应力水平下 GO 掺量对 GO/SBS 改性沥青的 R 和 J_{nr} 的影响

Fig. 5 Influences of GO content on R and J_{nr} of GO/SBS modified asphalt under different stress levels

波动幅度较小, 说明在此温度下 GO 复配效果并不显著。在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温条件下, 随着 GO 掺量的增加, S 值表现为先减小后增大, 当 GO 掺量为 0.6% 时 S 获得最小值 453.2 MPa, GO 掺量进一步增大时 S 值变化并不明显。m 则随着 GO 含量的增加呈现出先增后减的趋势, 在 GO 含量为 0.6% 时 m 最大值为 0.268; 当 GO 用量继续提高时, m 又逐渐回落, 降低幅度同样不大。S 值的变化趋势表明, GO 能够适度降低 SBS 改性沥青的低温蠕变刚度 (很有限), 增强沥青的韧性, 而过量的 GO 则会弱化 SBS 改性沥青的韧性, 增加沥青的刚性, 增加 SBS 改性沥青的低温开裂风险。m 值的变化则说明, GO 能够及时释放 SBS 改性沥青内部的温度应力, 使得沥青避开极大的开裂风险, 过量的 GO 可能会阻碍沥青分子的运动, 进而抑制 GO/SBS 改性沥青的应力松弛能力^[27]。综合分析 S 值和 m 值可以发现, GO 对 SBS 改性沥青的抗低温开裂性能提升效果并不明显, GO 用量过高或过低均不利于 GO/SBS 改性沥青路用性能的提升。



(a) 对蠕变刚度的影响



(b) 对蠕变速率的影响

图 6 GO 掺量对 GO/SBS 改性沥青的低温开裂参数的影响
Fig. 6 Influence of GO content on low-temperature cracking parameters of GO/SBS modified asphalt

2.5 氧化石墨烯复配 SBS 改性沥青的微观结构

采用高分辨率光学显微镜对不同掺量 GO 复配 SBS 改性沥青结合料进行了形貌表征 (图 7)。通过图 7 可以看出, 较低用量 (不超过 0.6%, 图 7 (a) ~ (d)) 的 GO 在 SBS 改性沥青中分布较为均匀, 且与 SBS 高聚物分子充分接触交联, 随着掺量进一步提高 (0.8% 和 1.0% GO, 图 7 (e) ~ (f)), GO 在 SBS 改性沥青基体中表现出团聚和堆积, 削弱了 GO 与 SBS 高聚物的相互作用, 从而引起 GO/SBS 改性沥青的性能衰减, 这也解释了上述 GO/SBS 改性沥青的流变行为变化规律。

2.6 氧化石墨烯对 SBS 改性沥青的作用机制

以往研究表明^[24,27], GO 通过物理共混的方式分散到 SBS 改性沥青基体, GO 与 SBS 改性剂没有产生化学反应, 然而 GO 独特的准二维结构及较大的比表面积使其更加容易与沥青分子混合, 尤其是 GO 与沥青中胶质之间的连接最为稳定, 从而改善了 SBS 改性沥青胶结料的流变和力学特性。在与 SBS 改性沥青的混合过程中, GO 能够被 SBS 高聚

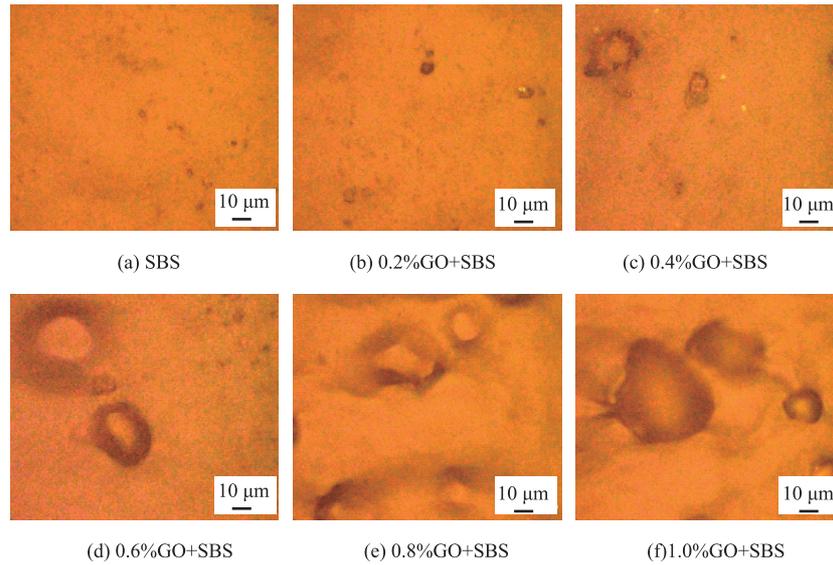


图7 不同含量的GO在SBS改性沥青中的分布

Fig. 7 Dispersion of different contents of GO in SBS modified asphalt

物插层,形成稳定的物理连接,进而提升SBS改性沥青的稳定性。GO表面存在着大量的含氧化学官能团使其能够和沥青中的成分形成氢键并产生分子间的范德华力,从而进一步促进了GO/SBS改性沥青路用性能的提升。

3 结论

(1) GO/SBS改性沥青的物理性能测试结果显示,GO的引入能够提高SBS改性沥青的软化点和延度,但会降低SBS改性沥青的针入度;离析试验则说明掺加GO虽然会增加SBS改性沥青的不均匀程度,但是整体离析仍然可控。

(2) 流变性能试验结果说明,添加GO能够明显提高SBS改性沥青的复数模量 G^* 和车辙因子 $G^*/\sin \delta$,降低相位角 δ ,进而提升SBS改性沥青的抗变形能力和高温稳定性。

(3) 高温稳定性能试验结果表明,GO/SBS改性沥青的变形恢复率 R 明显提高,不可恢复蠕变柔量 J_{ir} 显著降低,即GO可以充分利用自身的纳米结构特性来增强SBS改性沥青内部的网络结构,进而改善SBS改性沥青的高温抗车辙性能。

(4) 低温开裂性能试验结果表明,GO能够在一定程度上提升SBS改性沥青的低温开裂抗性,但是整体改善效果并不显著,0.6%的GO对SBS改性沥青的低温开裂影响较为显著。

(5) 微观形貌图像说明,适当掺量(不超过0.6%)的GO能够在SBS改性沥青基体中均匀分

散,过量的GO则导致团聚与堆积,不利于GO/SBS复合改性沥青的性能提升。

参考文献:

References:

- [1] 蒋振雄. SBS改性沥青指标体系研究综述[J]. 公路, 2019(10): 272-277.
JIANG Zhen-xiong. Review of Researches on SBS Modified Asphalt Indication System [J]. Highway, 2019(10): 272-277.
- [2] 左锋,叶奋,王泽,等. 耦合老化作用下混合料中SBS改性沥青的老化行为研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2): 401-406.
ZUO Feng, YE Fen, WANG Ze, et al. Aging Behavior of SBS Modified Asphalt Mixture under Coupled Aging [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2): 401-406.
- [3] 周振君,王俊岩,丛培良. SBS改性沥青热储存及运输过程中的降解研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2): 430-437.
ZHOU Zhen-jun, WANG Jun-yan, CONG Pei-liang. Effects of Degradation of SBS Modified Asphalt Binders during Thermal Storage and Transportation [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2): 430-437.
- [4] 周昆,刘西胤,王鑫洋,等. 不同支链的聚烯烃对SBS改性沥青低温及微观特性影响[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2020, 44(1): 158-161.
ZHOU Kun, LIU Xi-yin, WANG Xin-yang, et al. Effect of Polyolefin with Different Branches on Low Temperature and Micro-properties of SBS Modified Asphalt [J].

- Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering Edition, 2020, 44 (1): 158–161.
- [5] 袁东东, 蒋玮, 肖晶晶, 等. SBS、橡胶和高黏改性沥青流变性能对比 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2020, 40 (1): 135–142.
YUAN Dong-dong, JIANG Wei, XIAO Jing-jing, et al. Comparison of Rheological Properties between SBS, Rubber and High-viscosity Modified Asphalt Binders [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2020, 40 (1): 135–142.
- [6] 宋家乐, 何璐, 王欣, 等. SBS 改性沥青的 RTFOT 微观老化机理 [J]. 公路交通科技, 2020, 37 (2): 1–7.
SONG Jia-le, HE Lu, WANG Xin, et al. Microscopic Aging Mechanism of SBS Modified Asphalt in RTFOT [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37 (2): 1–7.
- [7] 张海涛, 李尚涛. 增塑 SBS 沥青与基质沥青老化耐久性的对比研究 [J]. 公路工程, 2019, 44 (6): 213–216, 239.
ZHANG Hai-tao, LI Shang-tao. Comparative Study on Anti-aging Durability of Plasticized SBS Asphalt and Matrix Asphalt [J]. Highway Engineering, 2019, 44 (6): 213–216, 239.
- [8] 姚晓光, 王燕, 许涛, 等. SBS 改性沥青老化模拟及再生研究 [J]. 武汉大学学报: 工学版, 2019, 52 (12): 1070–1078.
YAO Xiao-guang, WANG Yan, XU Tao, et al. Research on Aging Simulation and Recycling of SBS Modified Asphalt [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019, 52 (12): 1070–1078.
- [9] 王笑风, 吕小武, 褚付克, 等. 不同类型橡胶粉与 SBS 复合改性沥青的性能特征分析 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38 (11): 3695–3702.
WANG Xiao-feng, LÜ Xiao-wu, CHU Fu-ke, et al. Performance Characteristics Analyses of Asphalt Modified by Different Types of Rubber Powder and SBS [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38 (11): 3695–3702.
- [10] 刘志前, 黄世禄, 孟凡涛. SBS 改性沥青混合料 Sup13 在热-氧条件下老化性能研究 [J]. 中外公路, 2019, 39 (6): 173–176.
LIU Zhi-qian, HUANG Shi-lu, MENG Fan-tao. Study on Aging Performance of SBS Modified Asphalt Mixture Sup13 under Hot-oxygen Condition [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39 (6): 173–176.
- [11] 常琨, 王选仓. SBS 改性沥青 RTFOT 老化黏附性量化评价方法研究 [J]. 公路交通科技, 2019, 36 (12): 29–36.
CHANG Kun, WANG Xuan-cang. Study on Quantitative Evaluation Method of Adhesion of SBS Modified Asphalt RTFOT Aging [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36 (12): 29–36.
- [12] 白献萍, 钱国平, 韦慧, 等. 紫外线光照辐射的 SBS 改性沥青老化研究现状 [J]. 材料科学与工程学报, 2019, 37 (5): 855–859.
BAI Xian-ping, QIAN Guo-ping, WEI Hui, et al. Review on SBS Modified Asphalt Aging under Ultraviolet Light Radiation [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2019, 37 (5): 855–859.
- [13] 曹芳. SBS 复合改性沥青抗老化性能指标研究 [J]. 中外公路, 2018, 38 (6): 269–273.
CAO Fang. Study on Anti-aging Performance Indicator of SBS Composite Modified Asphalt [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38 (6): 269–273.
- [14] 刘彪, 黄志轩, 周垚, 等. 纳米氧化锌、碳酸钙材料改性沥青混合料路用性能的试验研究 [J]. 北方交通, 2020 (2): 52–56.
LIU Biao, HUANG Zhi-xuan, ZHOU Yao, et al. Experimental Study on Road Performance of Nanometer Zinc Oxide and Calcium Carbonate Modified Asphalt Mixture [J]. Northern Communications, 2020 (2): 52–56.
- [15] 周绪冬, 李雨林, 吴昱林, 等. 纳米材料改性沥青混合料路用性能试验研究 [J]. 交通科技与经济, 2019, 21 (6): 59–63.
ZHOU Xu-dong, LI Yu-lin, WU Yu-lin, et al. Experimental Study on Road Performance of Nano-material Modified Asphalt Mixture [J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2019, 21 (6): 59–63.
- [16] ZENG W, WU S, PANG L, et al. The Utilization of Graphene Oxide in Traditional Construction Materials: Asphalt [J]. Materials, 2017, 10 (1): 10010048.
- [17] HABIB N Z, AUN N C, ZOOROB S E, et al. Use of Graphene Oxide as a Bitumen Modifier: An Innovative Process Optimization Study [J]. Advanced Materials Research, 2015, 1105: 365–369.
- [18] LI Y, WU S, AMIRKHANDANIAN S. Investigation of the Graphene Oxide and Asphalt Interaction and Its Effect on Asphalt Pavement Performance [J]. Construction and Building Materials, 2018, 165: 572–584.
- [19] WANG R, YUE J, LI R, et al. Evaluation of Aging Resistance of Asphalt Binder Modified with Graphene Oxide and Carbon Nanotubes [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31 (11): 04019274.
- [20] ZENG Q, LIU Y, LIU Q, et al. Preparation and Modification Mechanism Analysis of Graphene Oxide

- Modified Asphalts [J]. Construction and Building Materials, 2020, 238: 117706.
- [21] 刘克非, 朱俊材, 吴超凡, 等. 氧化石墨烯改性沥青及其混合料抗老化性能试验研究 [J]. 公路, 2020, 65 (2): 225-230.
LIU Ke-fei, ZHU Jun-cai, WU Chao-fan, et al. Experimental Study on Aging Resistance of Graphene Oxide Modified Asphalt and Its Mixture [J]. Highway, 2020, 65 (2): 225-230.
- [22] LIN M, WANG Z L, YANG P W, et al. Micro-structure and Rheological Properties of Graphene Oxide Rubber Asphalt [J]. Nanotechnology Reviews, 2019, 8 (1): 227-235.
- [23] YU R, ZHU X, HU J, et al. Preparation of Graphene Oxide and Its Modification Effect on Base Asphalt [J]. Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures, 2019, 27 (3): 256-264.
- [24] LI J, HAN M, MUHAMMAD Y, et al. Preparation and Properties of SBS-g-GOs-modified Asphalt Based on a Thiol-ene Click Reaction in a Bituminous Environment [J]. Polymers, 2018, 10 (11): 10111264.
- [25] 郭诗惠, 刘炳. 纳米材料复配对SBS改性沥青流变及抗老化性能的影响 [J]. 中外公路, 2019, 39 (3): 241-6.
GUO Shi-hui, LIU Bing. Influence of Nano-material Compound on Rheological and Anti-aging Properties of SBS Modified Asphalt [J]. China & Foreign Highway, 2019, 39 (3): 241-246.
- [26] JTG E20—2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程 [S].
JTG E20—2011, Standard Test Methods of Bitumen and Bituminous Mixtures for Highway Engineering [S].
- [27] LIU K, ZHANG K, SHI X. Performance Evaluation and Modification Mechanism Analysis of Asphalt Binders Modified by Graphene Oxide [J]. Construction and Building Materials, 2018, 163: 880-889.

(上接第9页)

- [17] PARK D W, SEO W J, KIM J, et al. Evaluation of Moisture Susceptibility of Asphalt Mixture Using Liquid Anti-stripping Agents [J]. Construction and Building Materials, 2017, 144: 399-405.
- [18] AMERI M, KOUCHAKI S, ROSHANI H. Laboratory Evaluation of the Effect of Nano-organosilane Anti-stripping Additive on the Moisture Susceptibility of HMA Mixtures under Freeze-thaw Cycles [J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 1009-1016.
- [19] BEHBAHANI H, ZIARI H, KAMBOOZIA N, et al. Evaluation of Performance and Moisture Sensitivity of Glasphalt Mixtures Modified with Nanotechnology Zycosoil as an Anti-stripping Additive [J]. Construction and Building Materials, 2015, 78: 60-68.
- [20] 张苛, 张争奇. 抗剥落剂对沥青混合料水稳定性影响的试验方法与指标研究 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2015, 38 (7): 955-961.
ZHANG Ke, ZHANG Zheng-qi. Test Method and Index of the Influence of Anti-stripping Agents on Water Stability of Asphalt Mixture [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2015, 38 (7): 955-961.
- [21] 张宏超, 孙立军. 沥青混合料水稳定性性能全程评价方法研究 [J]. 同济大学学报, 2002, 30 (4): 422-426.
ZHANG Hong-chao, SUN Li-jun. Research on Methods for Evaluating Water Stability of Hot Mixed Asphalt [J]. Journal of Tongji University, 2002, 30 (4): 422-426.
- [22] HAGSHENAS H F, KHODAII A, SALEH M. Long Term Effectiveness of Anti-stripping Agents [J]. Construction and Building Materials, 2015, 76: 307-312.
- [23] GAWEL I, CZECHOWSKI F, KOSNO J. An Environmental Friendly Anti-aging Additive to Bitumen [J]. Construction and Building Materials, 2016, 110: 42-47.
- [24] HESAMI E, MEHDIZADEH G. Study of the Amine-based Liquid Anti-stripping Agents by Simulating Hot Mix Asphalt Plant Production Process [J]. Construction and Building Materials, 2017, 157: 1011-1017.
- [25] XIAO F, AMIRKHANDAN S N. Effects of Liquid Antistrip Additives on Rheology and Moisture Susceptibility of Water Bearing Warm Mixtures [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24 (9): 1649-55.
- [26] 任满仓. 抗剥落剂对沥青路用性能影响研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
REN Man-cang. Effect of Anti-stripping Agent on Asphalt Pavement Performance [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.