

文章编号:1671-8879(2020)01-0040-09

# 氧化石墨烯改性沥青性能评价及其 OGFC 混合料路用性能

刘克非<sup>1</sup>,朱俊材<sup>1</sup>,张雪飞<sup>1</sup>,李 泉<sup>2</sup>,吴超凡<sup>2</sup>

(1. 中南林业科技大学 南方绿色道路研究所,湖南 长沙 410004;  
2. 湖南省建筑固废资源化利用工程技术研究中心,湖南 长沙 410205)

**摘要:**为制备氧化石墨烯(GO)高黏改性沥青,采用 GO 和 SBS 粒子为复配改性剂对 70# 基质沥青进行复合改性。通过沥青结合料常规性能、流变性能和黏附性能测试对 GO 改性沥青性能进行表征;采用 3 种高黏沥青(GO 改性基质沥青、GO/SBS 改性沥青和壳牌高黏沥青)制备开级配磨耗层(OGFC-13)混合料并评价其路用性能,考察 GO 改性沥青应用于 OGFC 混合料的适用性。结果表明:GO 可显著提升沥青的黏度、稠度、刚度、韧性、抗永久变形能力、热储存稳定性和黏附性能,而对沥青低温抗裂性能影响并不显著,GO 对基质沥青的改性效果优于改性沥青;GO 改性沥青具有较好的固态交联网络,在高温(60 ℃)下可抑制胶体结构的破坏并提高沥青的弹性恢复功能;GO 的加入可提高沥青的色散分量和极性分量,并提高沥青的表面自由能,进而提升沥青的黏附性能;GO 可有效减缓沥青老化过程中轻质组分的挥发,从而降低老化对 OGFC 混合料劲度和弹塑性能的影响,在全面提高混合料老化性能的同时延长路面使用寿命;与壳牌高黏沥青结(混)合料相比,GO/SBS 改性沥青结(混)合料具有优良的高温稳定性、施工和易性、水稳定性、低温抗裂性和抗老化性能,是一种具有高性能的高黏改性沥青结(混)合料。未来可尝试采用加入芳烃油、木质素纤维等方法进一步改善 GO 改性沥青结(混)合料的低温抗裂性和耐久性。

**关键词:**道路工程;高黏改性沥青;性能评价;氧化石墨烯;透水沥青路面;黏附性能

**中图分类号:**U416.217 **文献标志码:**A **DOI:**10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.01.004

## Performance evaluation of graphene oxide modified asphalt and pavement performance of OGFC mixtures

LIU Ke-fei<sup>1</sup>, ZHU Jun-cai<sup>1</sup>, ZHANG Xue-fei<sup>1</sup>, LI Quan<sup>2</sup>, WU Chao-fan<sup>2</sup>

(1. Institute of Southern Green Road, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China; 2. Hunan Provincial Engineering Research Center for Construction Solid Wastes Recycling, Changsha 410205, Hunan, China)

**Abstract:** To prepare graphene oxide (GO) high viscosity modified asphalt, GO and styrene-

收稿日期:2019-10-20

基金项目:中国博士后科学基金项目(2018M633003);湖南省重点领域研发计划项目(2019GK2244);

湖南省教育厅科学研究项目(18A176);工程流变学湖南省重点实验室开放基金项目(19HNKLE05);

长沙市科技计划项目(kq1801081);长沙市雨花区科技计划项目(YHKJ-2018-ZG-20);长沙县科技计划项目(2019-1969)

作者简介:刘克非(1982-),女,辽宁昌图人,教授,工学博士,博士后,E-mail:liukefei92013@163.com。

通讯作者:吴超凡(1968-),男,湖南涟源人,研究员,工学博士,E-mail:cfwu0188@126.com。

butadiene-styrene (SBS) particles were used as composite modifiers to modify 70<sup>#</sup> base asphalt. The properties of the GO modified asphalt were characterized by testing the conventional performance, rheological performance, and adhesion performance of asphalt binder. Three kinds of high-viscosity asphalt (GO modified base asphalt, GO/SBS modified asphalt, and Shell high viscosity asphalt) were used to prepare the open graded friction course (OGFC-13) mixture and evaluate its pavement performance, and the applicability of GO modified asphalt in the OGFC mixture was investigated. The results show that the GO can significantly improve the viscosity, consistency, stiffness, toughness, permanent deformation resistance, thermal storage stability, and adhesion of asphalt, but has no significant effect on the low-temperature crack resistance of asphalt. Furthermore, GO has a better modification effect on base asphalt than modified asphalt, and GO modified asphalt has a good solid-state cross-linking network, which can inhibit the damage of a colloidal structure and improve the elastic recovery function of asphalt at a high temperature (60 °C). The addition of GO can improve the dispersion and polarity components of asphalt as well as its surface free energy, thereby improving its adhesion property. GO can effectively slow down the volatilization of light components in the asphalt aging process, thus reducing the impact of aging on the stiffness and elastic-plastic properties of OGFC mixtures, it can improve the aging performance of mixtures in an all-round way and prolong the service life of pavement. Compared with the Shell high viscosity asphalt binder (mixture), the GO/SBS modified asphalt binder (mixture) has excellent high-temperature stability, construction workability, water stability, low-temperature crack resistance, and aging resistance. It is a high-performance and high viscosity modified asphalt binder (mixture) with overall excellent performance. In the future, the addition of aromatic oil and lignin fiber can be used to further improve the low-temperature crack resistance and durability of GO modified asphalt binder (mixture). 5 tabs, 5 figs, 37 refs.

**Key words:** road engineering; high viscosity modified asphalt; performance evaluation; graphene oxide; porous asphalt pavement; adhesion performance

## 0 引言

开级配磨耗层(OGFC)是一种具有粗糙表面纹理和相互连通空隙的多孔沥青混合料路面,用于铺装 in 典型不透水路面的顶部,具有排水、防滑、降噪等功能<sup>[1-2]</sup>。OGFC 可有效解决城市化所带来的路面排水困难和行车噪音等问题,受到世界各国道路建设机构的青睐,并得到广泛应用。OGFC 路面起源于欧洲,德国于 1960 年首次采用 OGFC 混合料铺装机场道路,随后在西班牙、英国和意大利等国家得到推广应用,其中西班牙于 1980~1990 年期间,OGFC 混合料路面的铺装超过  $3 \times 10^6 \text{ m}^2$ <sup>[3]</sup>。1970 年美国联邦公路局(FHWA)通过对碎石封层改进开发出 OGFC,随后凭借其良好的抗滑性能而在美国各州的高速公路建设中得到应用<sup>[4]</sup>。日本 OGFC 混合料路面的研究应用始于 1976 年从欧洲引进的 OGFC 路面技术,并于 1996 年编写了《排水路面技

术指南》,为 OGFC 路面的设计施工提供了技术标准<sup>[5-6]</sup>。中国对 OGFC 路面的研究起步较晚,虽取得一定的成果,但技术和方法多参考国外,其关键材料高黏改性沥青大部分依靠进口。然而,由于 OGFC 路面空隙率较大(通常为 18%~25%),受到空气、阳光和水分侵蚀的几率大幅增加,导致路面易老化、松散和剥落等,影响路面耐久性和使用寿命<sup>[7-8]</sup>。

与普通密实型沥青混合料相比,具有骨架空隙结构的 OGFC 路面更容易产生结合料析漏和剥落,因而 OGFC 路面结构的整体稳定性主要依靠沥青的黏结能力维持,即应选用高黏沥青作为 OGFC 沥青混合料的胶结料<sup>[9-11]</sup>。国内外道路工程界通常采用添加改性剂的方法提高沥青结合料的黏度和稳定性。冯新军等用特立尼达湖沥青(TLA)与 SBS 复配改性沥青制备了高黏沥青(TS)用于拌制 OGFC 混合料<sup>[2]</sup>。徐世国等采用自主研发的 SINO TPS 改性剂与壳牌 70 号沥青相结合制备高黏沥青,其显著提高了基质沥青

的高温稳定性、低温抗裂性和耐久性<sup>[12]</sup>。曹东伟等采用自制改性粒子(SR)与SBS复配制备高黏沥青,以提高基质沥青的空间网络结构及稳定性<sup>[13]</sup>。Tanzadeh等的研究表明,纳米硅的加入可在提高OGFC混合料抗拉强度的同时降低其氧化敏感性<sup>[14]</sup>。陈瑶等以60℃黏度为关键评价指标,评价了高黏度沥青改性剂(TPS)对沥青黏度的影响<sup>[15]</sup>。王笑风等分析了橡胶颗粒提高沥青结合料黏度的作用机理,并测试了橡胶沥青混合料的路用性能<sup>[16]</sup>。不同工艺条件下,增黏树脂、高分子聚合物、纤维、纳米材料、橡胶等都是制备高黏沥青的优良添加剂。但是,现有的采用纳米颗粒制备高黏沥青的研究较少,尤其是新型碳纳米材料改性沥青及其OGFC混合料的性能研究鲜有报道,这在一定程度上限制了高品质高黏改性沥青的研究与应用。

纳米材料具有比表面积大、小尺寸效应以及宏观量子隧道效应等优良性能,能改变沥青结合料的微观结构,使沥青具有优良的力学、热学及黏附性能<sup>[17]</sup>。Pan等采用多壁碳纳米管MWCNTs、SBS以及MWCNTs/SBS制备高黏改性沥青,并研究了其60℃动力黏度,结果表明,单一的MWCNTs和SBS可使沥青的动力黏度分别提高36%和1200%,两者复合改性时则可增大5300%<sup>[18]</sup>。刘衡采用OGFC混合料研究了MWCNTs/SBS复合高黏改性沥青的路用性能,结果表明该高黏改性沥青混合料的高、低温性能和抗水损害性能满足相关规范要求<sup>[19]</sup>。Hu等研究了纳米碳酸钙(CaCO<sub>3</sub>)与Superflex天然橡胶复合改性高黏沥青的常规性能(针入度、软化点和延度等),结果表明,纳米CaCO<sub>3</sub>可提高高黏改性沥青的常规性能<sup>[20]</sup>。

氧化石墨烯(GO)是一种源于石墨的新型碳纳米材料,是制备石墨烯的前体。GO表面含氧官能团较多,使其具有极强的反应特性并可与众多聚合物稳定相容<sup>[21-22]</sup>。于瑞恩采用GO与聚氨酯复配制备改性沥青结合料,研究发现复合改性沥青结合料不仅具有良好的储存稳定性,且其高、低温稳定性及抗老化性能更佳<sup>[23]</sup>。Habib等研究发现,少量的GO(掺量为0.1125%或0.225%,质量分数,下同)可提高90#基质沥青结合料的刚度,并改善其高温抗车辙性能<sup>[24]</sup>。Zeng等研究了GO对70#和90#两种基质沥青性能的影响,结果表明添加1.0%或3.0%的GO可改善沥青结合料的高温稳定性、低温抗裂性能和抗老化性能<sup>[25]</sup>。Wu等通过傅里叶变换红外光谱(FTIR)和动态剪切流

变试验,研究了薄膜烘箱试验(TFOT)和紫外(UV)老化后的GO改性沥青结合料的抗老化性能,结果表明,添加1.0%或3.0%的GO可改善90#基质沥青和SBS改性沥青的抗热氧老化性能、抗UV老化性能以及物理稳定性<sup>[26]</sup>。此外,Liu等研究了GO改性沥青的改性机理,发现GO可与基质沥青发生物理共混和化学反应,而与SBS仅发生物理共混<sup>[27-28]</sup>。同时,Zhu等采用AC-13C型级配研究了温/热拌GO改性沥青混合料的路用性能,发现GO的加入可显著提高沥青混合料的高温稳定性、抗变形能力及抗老化性能,尤其对混合料水稳定性的改善效果极为显著<sup>[29]</sup>。

综上所述,GO改性沥青结合料的性能优良且与集料黏附性良好,具备作为高黏改性沥青的潜质。因此,本文将GO加入基质沥青及SBS改性沥青中制备高黏改性沥青,并测试沥青结合料的常规性能(动力黏度、布氏黏度和三大指标)、流变性能(动态剪切流变试验、多应力蠕变恢复试验和弯曲蠕变劲度试验)和黏附性能(接触角试验)表征GO改性沥青的性能。采用3种高黏沥青(GO改性基质沥青、GO/SBS改性沥青和壳牌高黏沥青)制备OGFC-13混合料并评价其路用性能,同时考察GO高黏改性沥青在OGFC混合料中的适用性,为GO改性沥青在高黏改性沥青的应用提供理论依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

基质沥青采用湖南高富70#石油沥青,SBS改性剂购自岳阳长炼石油化工厂,将4%的SBS改性剂加入到基质沥青中制得SBS改性沥青,2种沥青基本技术指标见表1。GO为采用Hummers方法在实验室内自制,呈黑色粉末状,见图1,其层间距为0.7~1.2 nm,比表面积为2100~2600 m<sup>2</sup>/g,GO的红外光谱测试结果见图2。基于已有的研究成果可知<sup>[27-28]</sup>,GO在基质沥青(70#)和SBS改性沥青中的最佳掺量分别为0.05%和0.2%。用于进行对比研究的高黏沥青为壳牌高黏沥青,其基本技术指标见表2。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 试样的制备

为保证GO在沥青结合料中的拌和均匀性,采用高速剪切仪制备GO改性高黏沥青。根据2种沥青(70#基质沥青和SBS改性沥青)的黏-温特性,在各自的混合料拌和温度条件下(即结合料黏度范围

0.15~0.19 Pa·s)制备 GO 改性高黏沥青<sup>[30]</sup>,具体 制备工艺流程见图 3。

表 1 基质沥青及 SBS 改性沥青基本技术指标

Tab. 1 Basic technical indicators of base asphalt and SBS modified asphalt

试验指标		70# 基质沥青	技术要求	SBS 改性沥青	技术要求
针入度(25 °C,100 g,5 s)/0.1 mm		64	60~80	49	40~60
软化点/°C		48.0	≥44.0	87.5	≥60.0
延度(5 cm·min <sup>-1</sup> )/cm		24.7(10 °C)	≥10.0(10 °C)	34.0(5 °C)	≥20.0(5 °C)
RTFO 试验(163 °C, 85 min)	质量变化/%	-0.01	-0.80~0.80	-0.01	-1.00~1.00
	残留针入度(25 °C,100 g,5 s)	69.8	≥58.0	76.0	≥65.0
	延度(10 °C,5 cm·min <sup>-1</sup> )/cm	10	≥4	24	≥5

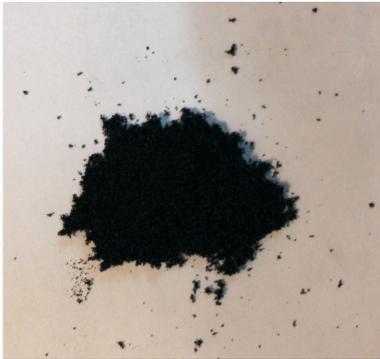


图 1 GO 形貌

Fig. 1 GO topography

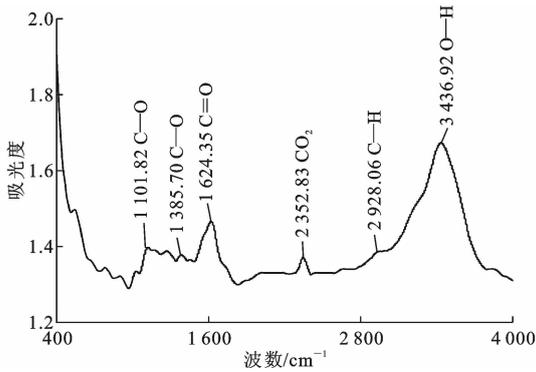


图 2 GO 红外光谱

Fig. 2 GO infrared spectrogram

牌高黏沥青的动力黏度(60 °C、真空减压毛细管法)、布氏黏度(135 °C/175 °C、布洛克菲尔黏度计法)、三大指标、黏韧性及韧性(25 °C)、离析软化点差等。

### 1.2.3 沥青结合料流变性能测试

按照 AASHTO T315-12 标准测定各沥青结合料 64 °C 下的复数模量  $G^*$ 、相位角  $\delta$  和车辙因子  $G^*/\sin(\delta)$ 。

按照 AASHTO T350-14 标准进行多应力蠕变恢复试验(MSCR),测定各沥青的恢复率  $R$  和不可恢复蠕变柔量  $J_{nr}$ 以评价其高温抗车辙性能。试验温度为 60 °C,每一循环加、卸载时间分别为 1、9 s,每个试样在 0.1 kPa 应力下循环 20 次,在 3.2 kPa 应力下循环 10 次,两级应力之间无间歇。

按照 AASHTO T313-12 标准进行弯曲蠕变劲度试验,测定各沥青的蠕变劲度模量  $S$  和蠕变速率  $m$ ,测试温度为 -12 °C。

### 1.2.4 接触角试验

为评定各沥青的黏附性能,采用德国 KRUSS 公司生产的 DSA100 型接触角测量仪测定各沥青与滴定液体的接触角,并计算各沥青的表面自由能。测试温度为 20 °C,制备的试样及现场测试情况见图 4 和图 5。

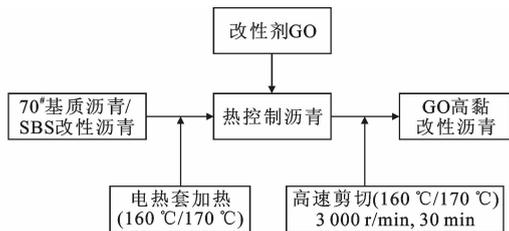


图 3 GO 高黏改性沥青制备工艺流程

Fig. 3 GO high viscosity modified asphalt preparation process

### 1.2.2 沥青结合料常规性能测试

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011),分别测试 70# 基质沥青、SBS 改性沥青、GO 改性基质沥青、GO/SBS 改性沥青和壳



图 4 接触角测试试样

Fig. 4 Contact angle test specimen

### 1.2.5 OGFC-13 混合料路用性能试验

分别采用 3 种高黏沥青(GO 改性基质沥青、GO/SBS 改性沥青和壳牌高黏沥青)在实验室内制备 OGFC-13 沥青混合料,按照《公路工程沥青及

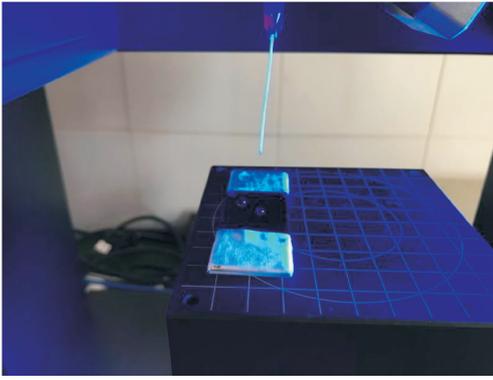


图5 接触角试验

Fig.5 Contact angle test

沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)测试各混

表2 各沥青结合料常规技术性能

Tab.2 Conventional technical properties of asphalt binders

技术指标	70# 基质沥青	SBS 改性沥青	GO 改性基质沥青	GO/SBS 改性沥青	壳牌高黏沥青
针入度(25 ℃,100 g,5 s)/0.1 mm	64	49	51	42	43
延度(15 ℃,5 cm·min <sup>-1</sup> )/cm	36	67	38	69	70
软化点/℃	48.0	87.5	78.5	93.4	82.6
60 ℃动力黏度/(Pa·s)	464	24 520	28 620	54 820	37 200
135 ℃布氏黏度/(Pa·s)	0.302	0.437	0.702	1.206	1.850
175 ℃布氏黏度/(Pa·s)	0.076	0.112	0.357	0.613	0.975
25 ℃黏韧性/(N·m)	12.1	19.2	18.6	23.8	23.7
25 ℃韧性/(N·m)	11.4	17.6	16.4	20.5	21.8
离析软化点差/℃	1.6	2.0	1.3	1.5	2.6

(1)GO 的加入可显著提高沥青的软化点并降低其针入度。与未添加 GO 的 70# 基质沥青相比,GO 改性基质沥青、GO/SBS 改性沥青的针入度分别降低了 20.3%、16.7%,软化点分别提高了 63.5%、6.74%。GO 可显著提升基质沥青的稠度,进而提高其刚度和抗永久变形能力。GO 对 SBS 改性沥青的改性效果不如基质沥青明显,这与已有研究结论相一致<sup>[27]</sup>。其原因是在 SBS 改性沥青中,中间嵌段苯乙烯(PS 段)和丁二烯(PB 段)消耗了基质沥青中的活性基团,因而其与 GO 的改性作用不如基质沥青明显<sup>[31]</sup>。值得注意的是,按照《透水沥青路面技术规程》(CJJ/T 190—2012)(下文简称规程)的要求,透水沥青路面使用的沥青结合料 25 ℃针入度应不小于 40(0.1 mm),软化点应不小于 80 ℃,而 GO 改性沥青不能满足软化点要求。

(2)GO 对沥青结合料的延度无显著影响,即其对沥青的低温抗裂性能改性效果不显著。

(3)GO 可显著提升沥青的黏度。无论是基质沥青还是 SBS 改性沥青,GO 均可将其黏度提高 1 倍以上。这主要是因为 GO 比表面积较大(2 100~

合料的高温稳定性(车辙试验)、低温抗裂性(小梁低温弯曲试验)、水稳定性(浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验)和排水性(渗水试验)。另外,为评价 GO 改性沥青 OGFC 混合料的老化性能,采用室内试验模拟 OGFC 混合料老化状态,并测定混合料老化后的低温抗裂性和水稳定性。混合料老化条件为将松散混合料置于 135 ℃烘箱中 4 h 后,在 85 ℃放置 10 d。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 沥青结合料常规性能分析

各沥青结合料常规性能测试结果见表 2。由表 2 可得如下结论。

2 600 m<sup>2</sup>/g)且表面富含含氧官能团,使其极易吸附沥青中的组分形成氢键并产生范德华力,从而提高沥青的稠度和黏度。此外,GO 的加入可大幅提高沥青分子间的交联密度,使分子间距减小并形成密实结构,因而沥青体系更加稳定,黏度显著提高<sup>[27]</sup>。GO 改性沥青的 60 ℃动力黏度均满足规程要求(≥ 2 000 Pa·s)。由布氏黏度测试结果可知,GO 改性沥青的施工和易性显著优于壳牌高黏沥青。

(4)GO 可显著改善沥青的黏韧性和韧性。与未添加 GO 的 70# 基质沥青相比,GO 改性基质沥青、GO/SBS 改性沥青的黏韧性和韧性分别提升了 53.7%、24.0%和 43.9%、16.5%。其主要原因为:分子间交联密度的提升引起了空间结构的改变,提高了沥青体系的黏聚力;GO 与沥青分子发生了化学反应,形成了小分子半聚物,进而增大了其黏韧性<sup>[27]</sup>。根据规程要求,高黏改性沥青的 25 ℃黏韧性需不小于 20 N·m,GO 改性基质沥青不满足这一要求。

(5)离析软化点测试结果表明,GO 可提升沥青结合料的热储存稳定性。这与 GO 材料的粒径尺寸有关,与 SBS 和高黏改性剂颗粒相比,GO 的粒径更

小,因而在拌和均匀的前提下储存稳定性更好。

(6)与壳牌高黏沥青相比,GO/SBS 改性沥青的常规性能基本与其相当,部分性能(布氏黏度、离析软化点差等)甚至优于壳牌高黏沥青,是一种性能优

良的高黏改性沥青。

## 2.2 沥青结合料流变性能分析

各沥青结合料流变性能测试结果见表 3。由表 3 可得如下结论。

表 3 沥青结合料流变性能

Tab. 3 Rheological properties of asphalt binders

技术指标	70 <sup>#</sup> 基质沥青	SBS 改性沥青	GO 改性基质沥青	GO/SBS 改性沥青	壳牌高黏沥青
车辙因子(64 °C)/kPa	2.631	6.657	6.018	14.859	13.647
恢复率 R(3.2 kPa)/%	1.029	34.945	3.883	51.317	35.326
不可恢复蠕变柔量 $J_{nr}$ (3.2 kPa)/kPa	2.954	1.638	1.450	0.596	0.892
蠕变劲度模量 S(-12 °C)/MPa	236.5	187.3	239.6	191.1	229.8
蠕变速率 $m$ (-12 °C)	0.306	0.332	0.302	0.327	0.315

(1)GO 对沥青结合料的高温性能改善效果显著。与未添加 GO 的 70<sup>#</sup> 基质沥青相比,GO 改性基质沥青和 GO/SBS 改性沥青的车辙因子分别提高了 128.7%和 123.2%,表现出了优越的高温稳定性。这主要是因为 GO 的加入可增强沥青体系的结构劲度和韧性,使其具有更强的抗永久变形能力<sup>[32]</sup>。

(2)与常规 DSR 测试相比,采用 MSCR 评价改性沥青结合料的高温性能可得到与现场路面性能更接近的结果,特别是对于改性沥青<sup>[33]</sup>。因此,本文采用 MSCR 测试评价 GO 对沥青结合料抗永久变形性能的改善作用,获取并分析沥青结合料的 2 个特征参数恢复率 R 和不可恢复蠕变柔量  $J_{nr}$ 。

GO 改性沥青均表现出更高的 R 值和更低的  $J_{nr}$  值。GO 的加入可使基质沥青和 SBS 改性沥青的 R 值分别提高 272.0%、46.9%,对应的  $J_{nr}$  值则分别降低 50.9%、63.6%。GO 改性沥青具有优良的弹性恢

复功能和抗永久变形能力。这是因为沥青中含有较多的轻质组分,当温度略高时(60 °C),胶束的吸收层变得越来越薄,轻质组分使胶体结构变得更加松散。GO 的加入和分散可有效抑制胶体结构的破坏,促进固态网络交联,从而提高沥青结合料的弹性<sup>[27]</sup>。

(3)弯曲蠕变劲度试验结果表明,添加 GO 不会对沥青结合料的低温抗裂性能产生显著影响,这一结论与延度测试结果一致。

(4)与壳牌高黏沥青相比,GO/SBS 改性沥青具有更优良的高温抗永久变形能力和相似的低温抗裂性能。

## 2.3 沥青结合料黏附性能分析

沥青的表面自由能(由色散分量和极性分量组成)可用于表征沥青结合料的黏附性,其值越大则沥青结合料的黏附性越好<sup>[34]</sup>。各沥青结合料黏附性能测试结果见表 4。

表 4 沥青结合料黏附性能

Tab. 4 Adhesion properties of asphalt binders

技术指标	70 <sup>#</sup> 基质沥青	SBS 改性沥青	GO 改性基质沥青	GO/SBS 改性沥青	壳牌高黏沥青	
接触角/(°)	蒸馏水	105.2	106.4	95.9	101.8	102.2
	丙三醇	98.5	95.2	86.3	90.2	90.6
	甲酰胺	92.5	88.1	79.5	81.9	81.2
色散分量/(mJ · m <sup>-2</sup> )	10.524	16.833	17.392	20.054	21.015	
极性分量/(mJ · m <sup>-2</sup> )	2.632	0.941	3.372	1.245	1.009	
表面自由能/(mJ · m <sup>-2</sup> )	13.156	17.774	20.765	21.300	22.024	

由表 4 可知,无论是基质沥青还是改性沥青,其色散分量均显著大于极性分量<sup>[35]</sup>。GO 的加入可提高沥青的色散分量(较强)和极性分量(较弱),进而提升沥青的黏附性能。与未添加 GO 的 70<sup>#</sup> 基质沥青相比,GO 改性基质沥青的色散分量和极性分量分别提高了 65.2%和 28.1%,GO/SBS 改性沥青则分别提高了 19.1%和 32.3%。这是因为 GO 的加入降低了沥青的接触角,因而增大了水分吸附于沥

青表面的难度,从而提高了其表面自由能。根据已有的研究成果<sup>[36]</sup>,沥青结合料的表面自由能直接影响沥青混合料的劈裂强度和冻融劈裂强度,进而影响混合料的水稳定性。因此,添加 GO 可有效提升沥青混合料的水稳定性。

## 2.4 OGFC-13 混合料路用性能分析

各高黏沥青 OGFC-13 混合料路用性能测试结果见表 5。由表 5 可得如下结论。

表5 高黏沥青 OGFC-13 混合料路用性能

Tab. 5 Pavement performance of OGFC-13 mixture with high viscosity asphalt

技术指标		GO 改性沥青混合料	GO/SBS 改性沥青混合料	壳牌高黏沥青混合料
动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )		5 867	7 964	6 880
破坏应变/10 <sup>-6</sup>	未老化	2 455.3	2 649.1	2 703.0
	老化后	2 252.2	2 531.1	2 365.2
残留稳定度/%	未老化	95.3	97.8	94.5
	老化后	99.4	102.3	91.6
残留强度比/%	未老化	94.7	96.1	92.2
	老化后	96.2	97.7	90.5
渗水系数/(mL·min <sup>-1</sup> )		398	425	413

(1)3种高黏沥青 OGFC-13 混合料的动稳定度均满足规程要求,动稳定度由大到小依次为 GO/SBS 改性沥青混合料、壳牌高黏沥青混合料、GO 改性沥青混合料。GO/SBS 改性沥青混合料的动稳定度比壳牌高黏沥青混合料高 15.8%,表现出优良的高温稳定性。

(2)3种高黏沥青 OGFC-13 混合料的破坏应变从大到小依次为壳牌高黏沥青混合料、GO/SBS 改性沥青混合料、GO 改性沥青混合料。GO/SBS 改性沥青混合料与壳牌高黏沥青混合料的破坏应变相对偏差值小于 2%,表明 GO/SBS 改性沥青混合料具有良好的低温抗裂性能。

(3)GO 改性沥青 OGFC-13 混合料的残留稳定性和残留强度比均高于壳牌高黏沥青混合料,表明 GO 对增强沥青混合料的水稳定性作用明显。各混合料的水稳定性均满足规程要求,GO/SBS 改性沥青混合料具有优良的水稳定性。

(4)3种高黏沥青 OGFC-13 混合料的排水性能从大到小依次为 GO/SBS 改性沥青混合料、壳牌高黏沥青混合料、GO 改性沥青混合料。

(5)GO 改性沥青混合料具有良好的抗老化性能。老化后 3 种高黏沥青混合料破坏应变降低幅度从大到小依次为壳牌高黏沥青混合料(12.5%)、GO 改性沥青混合料(8.3%)、GO/SBS 改性沥青混合料(4.5%),GO 的加入可在一定程度上减缓老化对沥青混合料低温抗裂性能的损伤作用<sup>[29]</sup>。老化后 GO 改性沥青混合料的残留稳定性和残留强度比都略有提升,其中 GO 改性沥青混合料的残留稳定性和残留强度比分别提高了 4.1%和 1.5%,GO/SBS 改性沥青混合料则分别提高了 4.5%和 1.6%;老化后壳牌高黏沥青混合料的残留稳定性和残留强度比分别降低了 2.9%和 1.7%。GO 改性沥青混合料具有较好的抗老化性能,可延长路面的使用寿命。其可能原因是 GO 改性沥青中轻组分含量少,片状的

GO 粒子分散于沥青中,使轻组分及游离氧的行走路径变得复杂,且 GO 增强了沥青各组分之间的黏聚作用,因此,可有效减缓老化过程中轻组分的挥发,降低老化对沥青混合料劲度和弹塑性能的影响。此外,GO 形成的层状结构膜可有效防止热氧的入侵,阻止内部混合料被进一步老化,从而减缓了老化对沥青混合料低温抗裂性能的影响<sup>[37]</sup>。

### 3 结 语

(1)GO 可显著提升沥青的黏度、稠度、刚度、韧性、抗永久变形能力和热储存稳定性,而对沥青低温抗裂性能影响并不显著;GO 对基质沥青的改性效果比改性沥青更显著。

(2)GO 改性沥青具有优越的高温稳定性和较好的固态交联网络,在高温(60℃)下可抑制胶体结构的破坏并提高沥青的弹性恢复功能,进而提高沥青的弹性和抗永久变形能力。

(3)GO 的加入可提高沥青的色散分量和极性分量,在降低沥青表面接触角的同时,提高沥青的表面自由能,进而提升沥青的黏附性能。

(4)GO 可增强沥青各组分间的黏聚作用,有效减缓沥青老化过程中轻质组分的挥发,从而降低老化对 OGFC 混合料劲度和弹塑性能的影响,在全面提升混合料老化性能的同时,可延长路面使用寿命。

(5)与壳牌高黏沥青结(混)合料相比,GO/SBS 改性沥青结(混)合料具有较好的高温稳定性、施工和易性、热储存稳定性、水稳定性和低温抗裂性,是一种具有广阔应用前景的高性能高黏改性沥青结(混)合料。

(6)为进一步改善 GO 改性沥青结(混)合料的低温抗裂性和耐久性,未来可采用加入芳烃油、木质素纤维等方法优化改性沥青性能。

## 参考文献:

## References:

- [1] WURST E J, PUTMAN J B. Laboratory evaluation of warm-mix open graded friction course mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 25(3):403-410.
- [2] 冯新军,解明卫,陈安迪. TS高黏度改性沥青的制备和OGFC混合料的路用性能[J]. 公路交通科技, 2019, 36(1):8-15.  
FENG Xin-jun, XIE Ming-wei, CHEN An-di. Preparation of TS high viscosity modified asphalt and pavement performance of OGFC mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(1):8-15.
- [3] RUIZ A, ALBEROLA R, PEREZ F, et al. Porous asphalt mixtures in Spain[J]. Transportation Research Record, 1990(1265):87-94.
- [4] KOH C. Tensile properties of open graded friction course (OGFC) mixture to evaluate top-down cracking performance[D]. Gainesville: University of Florida, 2009.
- [5] 王磊. OGFC级配特点及路用性能研究[D]. 西安:长安大学, 2009.  
WANG Lei. Study on OGFC gradation regulations and pavement performance[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [6] 樊统江,贾敬鹏,陈富强,等. 排水沥青混凝土路面技术及其在日本的发展[J]. 公路, 2007, 52(1):14-20.  
FAN Tong-jiang, JIA Jing-peng, CHEN Fu-qiang, et al. Drainage asphalt concrete pavement technology and its developments in Japan[J]. Highway, 2007, 52(1):14-20.
- [7] 李立寒,耿韩,孙艳娜,等. 高粘度沥青性能评价指标与标准的试验[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2010, 38(8):1155-1160.  
LI Li-han, GENG Han, SUN Yan-na, et al. Viscosity evaluating indicators and criteria of high-viscosity modified asphalt[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(8):1155-1160.
- [8] 李永波. 国产TPS在排水沥青路面中的应用研究[D]. 西安:长安大学, 2013.  
LI Yong-bo. Study on the application of domestic TPS in drainage asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [9] 杨昆,刘栋. 天然湖沥青+SBS复合改性沥青混合料性能研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(7):28-32.  
YANG Kun, LIU Dong. Research on performance of Trinidad Lake Asphalt added with SBS-modified asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(7):28-32.
- [10] 王慧,刘黎萍,朱琨琨,等. 排水性面层高粘度改性沥青的选择[J]. 公路工程, 2010, 35(5):124-127.  
WANG Hui, LIU Li-ping, ZHU Kun-kun, et al. High viscosity modified asphalt option of drainage layer[J]. Highway Engineering, 2010, 35(5):124-127.
- [11] 刘东美,叶庆凡,于晓霞,等. 排水路面高黏沥青及其混合料性能试验研究[J]. 山东建筑大学学报, 2019, 34(2):17-21.  
LIU Dong-mei, YE Qing-fan, YU Xiao-xia, et al. Experimental research on high viscosity asphalt and mixtures for porous pavement[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2019, 34(2):17-21.
- [12] 徐世国,何唯平. 排水沥青混合料高黏改性沥青研究[J]. 公路, 2016, 61(3):166-170.  
XU Shi-guo, HE Wei-ping. Research on the high-viscosity modified asphalt of porous asphalt mixture[J]. Highway, 2016, 61(3):166-170.
- [13] 曹东伟,卢杰,张海燕,等. 全透式沥青路面专用高黏度改性沥青性能对比[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2019, 39(1):17-24.  
CAO Dong-wei, LU Jie, ZHANG Hai-yan, et al. Contrastive on performance of fully permeable asphalt pavement dedicated high-viscosity modified asphalt[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2019, 39(1):17-24.
- [14] TANZADEH J, GAMASAEI R S, GILANI F R. Laboratory evaluation on the performance comparison between OGFC asphalt reinforcement with fibers and modified with nanosilica[J/OL]. Journal of Testing and Evaluation, 2020, 48. [2018-12-10]. <https://doi.org/10.1520/JTE20170546>.
- [15] 陈瑶,谭忆秋,陈克群. TPS改性剂对高粘沥青性能的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(6):82-85.  
CHEN Yao, TAN Yi-qiu, CHEN Ke-qun. Effect of TPS modifier on the properties of high-viscosity asphalt[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(6):82-85.
- [16] 王笑风,曹荣吉. 橡胶沥青的改性机理[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2011, 31(2):6-11.  
WANG Xiao-feng, CAO Rong-ji. Rubber asphalt modification mechanism[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(2):6-11.

- [17] FANG C, YU R, LIU S, et al. Nanomaterials applied in asphalt modification: A review[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2013, 29(7): 589-594.
- [18] PAN B, CHEN L, WANG B. The impact of MWCNTs on the viscosity of modified asphalt[J]. *Nanoscience and Nanotechnology Letters*, 2013, 5(7): 801-804.
- [19] 刘衡. 高粘改性沥青混合料设计与性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.  
LIU Heng. The design and performance study on high-viscosity modified asphalt mixture[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [20] HU X, WANG H, WANG H. The performance of nanometer  $\text{CaCO}_3$  high-viscosity compound modified asphalt[C]//ICTIM. *Proceedings of the 1st International Conference on Transportation Infrastructure and Materials*. San Antonio: ICTIM, 2016: 210-218.
- [21] ALLISTER M J, LI J L, ADAMSON D H, et al. Single sheet functionalized graphene by oxidation and thermal expansion of graphite[J]. *Chemistry of Materials*, 2007, 19(18): 4396-4404.
- [22] WANG J, JIA H, JI D, et al. Enhancements of the mechanical properties and thermal conductivity of carboxylated acrylonitrile butadiene rubber with the addition of graphene oxide[J]. *Journal of Materials Science*, 2013, 48(4): 1571-1577.
- [23] 于瑞恩. 氧化石墨烯/聚氨酯复配改性沥青的制备和性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2016.  
YU Rui-en. Preparation and properties of asphalt modified with graphene oxide/polyurethane composite[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016.
- [24] 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.
- [25] ZENG W, WU S, PANG L, et al. The utilization of graphene oxide in traditional construction materials: Asphalt[J]. *Materials*, 2017, 10(1): 48.
- [26] WU S, ZHAO Z, LI Y, et al. Evaluation of aging resistance of graphene oxide modified asphalt[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(7): 702.
- [27] LIU K, ZHANG K, SHI X M. Performance evaluation and modification mechanism analysis of asphalt binders modified by graphene oxide[J]. *Construction & Building Materials*, 2018, 163: 880-889.
- [28] LIU K, ZHANG K, WU J, et al. Evaluation of mechanical performance and modification mechanism of asphalt modified with graphene oxide and warm mix additives[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 193: 87-96.
- [29] 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 & Building Materials*, 2019, 217: 273-282.
- [30] 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 Jun-cai, LI Quan, LIU Ke-fei. Properties of graphene oxide modified asphalt binder[J]. *China Powder Science and Technology*, 2018, 24(4): 70-76.
- [31] 杨建新. SBS改性沥青配伍与性能指标关系研究[D]. 南京: 东南大学, 2011.  
YANG Jian-xin. Relationship between compatibility and performance index of SBS modified asphalt[D]. Nanjing: Southeast University, 2011.
- [32] LIU K, ZHU J, ZHANG K, et al. Effects of mixing sequence on mechanical properties of graphene oxide and warm mix additive composite modified asphalt binder[J]. *Construction & Building Materials*, 2019, 217: 301-309.
- [33] LIANG M, REN S, FAN W, et al. Rheological property and stability of polymer modified asphalt: Effect of various vinyl-acetate structures in EVA copolymers[J]. *Construction & Building Materials*, 2017, 137: 367-380.
- [34] CHENG D X, LITTLE D N, LYTTON R L, et al. Moisture damage evaluation of asphalt mixtures by considering both moisture diffusion and repeated load conditions[J]. *Transportation Research Record*, 2003(1832): 42-49.
- [35] CHENG D X, LITTLE D N, LYTTON R L, et al. Use of surface free energy properties of the asphalt-aggregate system to predict moisture damage potential[J]. *Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists*, 2002, 71: 59-88.
- [36] 孔令云, 徐燕, 成志强. 基于表面能的 Sasobit 影响 WMA 劈裂强度机理研究[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(4): 669-673.  
KONG Ling-yun, XU Yan, CHENG Zhi-qiang. Mechanism of WMA splitting strength of Sasobit based on surface free energy[J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(4): 669-673.
- [37] LI Y, WU S, AMIRKHANIAN S. Investigation of the graphene oxide and asphalt interaction and its effect on asphalt pavement performance[J]. *Construction & Building Materials*, 2018, 165: 572-584.