

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.03.005

文章编号:1672-9331(2022)03-0050-09

引用格式:么子成,林祥波,刘昌崑,等.纳米碳化硅改性沥青的抗老化性能及机理研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(3):50-58.

Citation: YAO Zicheng, LIN Xiangbo, LIU Changwei, et al. Study on the aging resistance and mechanism of nano-SiC modified asphalt[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(3): 50-58.

纳米碳化硅改性沥青的抗老化性能及机理研究

么子成¹, 林祥波¹, 刘昌崑¹, 刘康¹, 李光耀²

(1. 青岛市交通规划设计院有限公司, 山东 青岛 266100; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】研究纳米碳化硅(SiC)改性沥青的抗老化性能及其微观机理。【方法】采用旋转薄膜烘箱老化试验(RTFOT)和压力老化试验(PAV)对 A-70[#] 基质沥青和掺入质量分数分别为 3%、6%、9% 纳米碳化硅的改性沥青进行短期及长期热氧老化,对老化前后的沥青进行传统物理性能试验、动态剪切流变试验(DSR)、弯曲梁流变试验(BBR)及傅里叶红外光谱试验(FTIR)。【结果】物理性能老化指数与流变老化指数结果一致,表明纳米碳化硅改性沥青的最佳掺量为 6%。【结论】纳米碳化硅的掺入可以提高沥青的高温稳定性以及抗老化性能,但对低温抗裂性能不利。纳米碳化硅能够有效抑制老化过程中羰基、亚砷基官能团的生成,阻止沥青进一步老化硬化。

关键词: 纳米碳化硅;改性沥青;抗老化性能;微观机理;老化指数

中图分类号: U414

文献标志码: A

0 引言

沥青路面凭借其优越的使用性能和行驶舒适性,在路面工程中占有相当大的比例。然而,由于沥青老化导致的沥青路面耐久性不足一直是道路界关注的问题^[1-4]。沥青胶结料在生产、运输、施工和长期使用过程中,在环境因素的作用下发生蒸发、氧化、脱氢、分解等物理化学变化,沥青发生硬化,进而造成沥青路面病害的形成^[5]。因此,提升沥青的抗老化性能对提高路面使用寿命具有重要的理论意义和应用价值。

近年来,越来越多的研究者使用纳米材料制备纳米改性沥青,研究其老化前后的物理性能、流变特性及抗老化性能等^[6-8]。樊亮等^[9]将纳米二氧化钛作为改性剂掺入两种基质沥青中,结果表

明,纳米二氧化钛能够显著提升沥青的抗紫外老化性能。李增杰等^[10]采用硬脂酸及纳米碳酸钙制备有机纳米碳酸钙改性沥青,研究发现,相同掺量下,有机碳酸钙改性沥青的抗老化性能要比碳酸钙改性沥青的好。杨小龙等^[6]发现纳米黏土的加入能够有利于提高沥青的抗热氧老化性能。可以看出,纳米材料改性沥青具有较大优势,已经成为道路材料领域的主流研究方向。另一方面,无机非金属纳米碳化硅材料已经广泛应用于复合材料领域中,但鲜少有研究将其应用于道路沥青材料中。有研究表明,将一定量的纳米碳化硅作为外掺剂加入沥青中,能够提升沥青的高温稳定性^[11]。纵观已有研究,国内外学者对纳米碳化硅改性沥青的研究主要关注其对沥青混凝土路用性能的提升,并未对其抗老化性能及老化机理进行全面的比较和评价。

收稿日期:2022-01-10;修回日期:2022-07-23;接受日期:2022-08-01

基金项目:山东省交通运输厅科技项目(2016B41)

通信作者:么子成(1980—)(ORCID:0000-0003-0239-4480),男,高级工程师,主要从事道路工程材料方面的研究。

E-mail:704354970@qq.com

投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

基于以上原因,本文研究了纳米碳化硅改性沥青的抗老化性能及老化机理,设计不同掺量的纳米碳化硅对沥青进行改性,采用旋转薄膜烘箱老化试验(rolling thin film oven test,RTFOT)和压力老化试验(pressure aging vessel,PAV)来模拟沥青的短期老化及长期老化。对不同老化程度的改性沥青进行取样,利用传统物理性能试验、动态剪切流变试验(dynamic shear rheological test,DSR)、弯曲梁流变试验(bending beam rheometer,BBR)测试了纳米碳化硅改性沥青老化前后的物理性能及流变特性变化,通过老化指标的变化评价抗老化性能,采用傅里叶红外光谱试验(fourier transform infrared,FTIR)对纳米进行微观分析,研究沥青的老化机理。

1 试验

1.1 原材料

选用广东省东莞市生产的埃索(Esso)A-70[#]基质沥青和粒径为 100 nm 的纳米碳化硅作为原材料,其主要技术指标见表 1~2。

表 1 沥青的物理性能

Table 1 Physical properties of asphalt

指标	试验值	试验方法
针入度(25 ℃)/(0.1 mm)	63.5	T 0604—2011
软化点/℃	52	T 0606—2011
延度(15 ℃)/cm	>100	T 0605—2011
相对密度(25 ℃)/(g·cm ⁻³)	1.043	T 0603—2011
短期老化后	质量变化/%	-0.13
	针入度比/%	65.2
	残留延度(15 ℃)/cm	6.8

表 2 纳米碳化硅的主要技术指标

Table 2 Main technical indexes of nano-SiC

材料种类	外观	比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	pH	质量分数/%	晶型
纳米 SiC	灰绿色粉末	62	4.1~4.8	99	六方晶体

1.2 纳米碳化硅改性沥青的制备

将 A-70[#] 基质沥青放入 150 ℃ 的烘箱中加热

至熔融状态,用容器称取一定质量的沥青,置于电热炉上加热保温。称取质量为沥青质量 3%、6%、9% 的纳米碳化硅粉末分别加入沥青中,使用高速剪切搅拌机进行搅拌,搅拌速率为 5 000 r/min,搅拌温度保持在 160 ℃ 左右,时间为 45 min。制备结束后将其放入 160 ℃ 烘箱中保温 30 min,充分发育,使纳米碳化硅粉末在沥青中均匀分散。

1.3 老化试样的制备

用 RTFOT 和 PAV 试验分别模拟沥青的短期老化及长期老化。短期老化步骤为:称取(35±0.5) g 加热至流动状的沥青装入旋转薄膜烘箱的各个盛样瓶中,烘箱温度设置为(163±0.5) ℃,老化时间为 85 min。长期老化步骤为:将短期老化后的流动状沥青倒入 PAV 老化盛样盘中,每盘均匀倒入(50±0.5) g 沥青,然后将盛样盘小心放入 PAV 老化仪内,加压至(2.1±0.1) MPa,待温度升至 100 ℃ 后自动开始计时,老化时间设置为 20 h。

1.4 传统物理性能试验

沥青的传统物理性能试验包括针入度、软化点、延度、黏度等试验,按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的 T0604、T0606、T0605 和 T0625 的相关规程进行测试。

1.5 DSR 试验

采用 DSR 试验研究纳米碳化硅改性沥青老化前后的高温性能。DSR 测试仪为德国 MCR-301 型高精度流变仪,采用应变控制方式,应变值控制在 12%,频率为 10 rad/s,板的直径、间隙厚度分别为 25 和 1 mm。在 60 ℃ 温度下进行 DSR 试验,试验结果包括复数剪切模量 G^* 、相位角 δ 及计算得到的车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 。

1.6 BBR 试验

采用 BBR 试验测试老化前后的纳米碳化硅改性沥青在 -12 和 -18 ℃ 下的低温流变特性。试验采用美国生产的 BBR-TE 型设备,在低温恒温浴槽中,在沥青梁中部施加恒定应力,计算纳米碳化硅改性沥青劲度模量 S 和蠕变速率 m 。

1.7 FTIR 试验

FTIR 试验采用 BRUKER 公司生产的 TEN-SOR27 型红外光谱仪进行。取 100 mg 的溴化钾粉末用压片机压成薄片,然后制备三氯乙烯改性沥青溶液,用针管将 1 mL 的溶液滴在溴化钾薄片上,待三氯乙烯挥发后,进行 FTIR 试验。

2 试验结果与分析

2.1 沥青老化前后的物理性能

对基质沥青和纳米碳化硅改性沥青老化前后的传统物理性能进行测试,包括针入度、软化点、延度、黏度,试验结果如图 1 所示。从图 1 可以看出,随着老化程度的加深,纳米碳化硅改性沥青的针入度、延度降低,而软化点与黏度升高。这是由于沥青老化后逐渐变硬变脆,轻组分减少,重组分

增多。纳米碳化硅改性沥青与基质沥青相比,具有较高的软化点与黏度,较低的针入度和延度,且随着纳米碳化硅粉末掺量的增加,这种趋势更加明显,表明纳米碳化硅可以提高基质沥青的高温稳定性,但对低温延展性能不利。究其原因,纳米碳化硅材料自身尺寸较小,其表面原子较多,所以表面能较大,纳米碳化硅均匀分散到沥青中,与沥青表面形成较强的表面结合能,从而使沥青更加稳定。因此,纳米碳化硅会降低基质沥青的针入度和延度,提高其软化点与黏度。

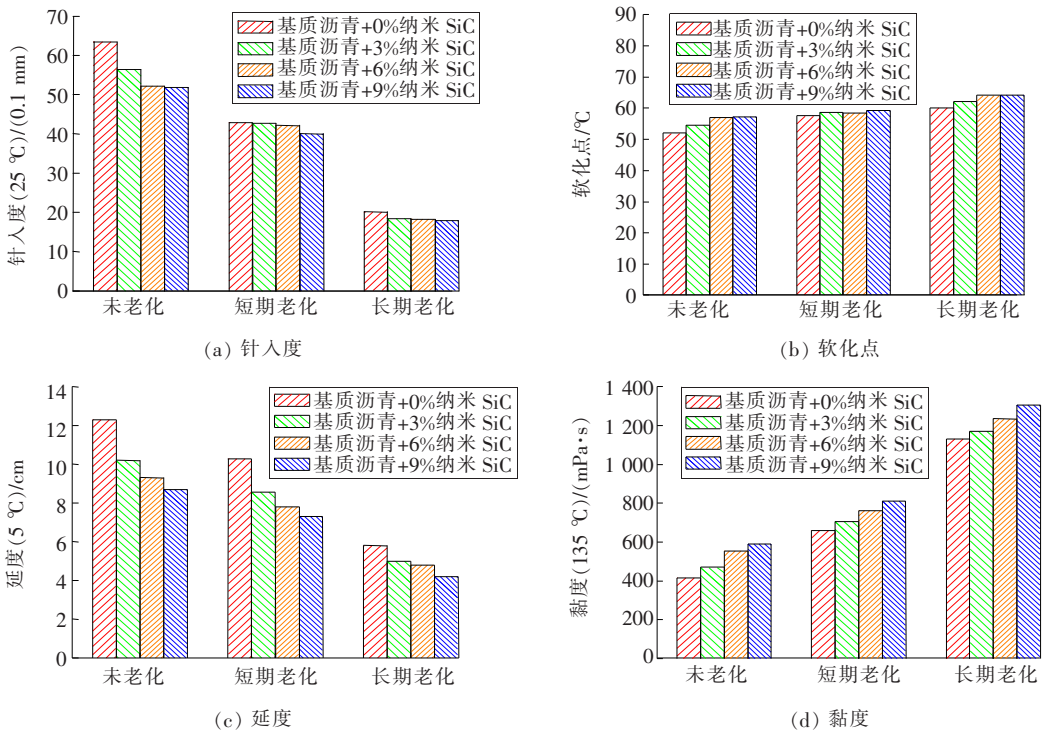


图 1 不同老化条件下沥青的物理性能

Fig. 1 Physical properties at various aging states

采用针入度老化指数(I_{pa})、软化点老化指数(I_{sa})、延度老化指数(I_{da})和黏度老化指数(I_{va})来评价纳米 SiC 改性沥青的抗老化性能,以上指数按照公式(1)~(4) 计算。

$$I_{pa} = \frac{|P_a - P_0|}{P_0} \tag{1}$$

式中: P_a 为老化后的针入度; P_0 为未老化的针入度。

$$I_{sa} = \frac{|T_{sp_a} - T_{sp_0}|}{T_{sp_0}} \tag{2}$$

式中: T_{sp_a} 为老化后的软化点; T_{sp_0} 为未老化的软化点。

$$I_{da} = \frac{|D_a - D_0|}{D_0} \tag{3}$$

式中: D_a 为老化后的延度; D_0 为未老化的延度。

$$I_{va} = \frac{|\eta_a - \eta_0|}{\eta_0} \tag{4}$$

式中: η_a 为老化后的黏度; η_0 为未老化的黏度。

由公式(1)~(4)可知, I_{pa} 、 I_{sa} 、 I_{da} 、 I_{va} 越大,表明改性沥青的老化越严重。不同纳米碳化硅掺量下的改性沥青经过短期及长期老化后的老化指数如图 2 所示(图中,种类 1 为基质沥青+0% 纳米 SiC;种类 2 为基质沥青+3% 纳米 SiC;种类 3 为基质沥青+6% 纳米 SiC;种类 4 为基质沥青+9% 纳米 SiC)。

由图 2 可以看出,从短期老化到长期老化,各

沥青的老化指数均显著增加,这表示其老化程度在加深。短期老化时,不同纳米碳化硅掺量的改性沥青的延度老化指数变化不太明显,而针入度老化指数、软化点老化指数及黏度老化指数变化趋势基本相同,即基质沥青老化指数较大,掺入 3% 纳米碳化硅之后,老化指数显著降低;当掺量

为 6% 时,老化指数降到最低;而当掺量为 9% 时,老化指数反而回升,表明纳米碳化硅掺量为 6% 时改性沥青抗老化性能最好。长期老化的改性沥青的物理老化指数变化趋势与短期老化的类似,这表明纳米碳化硅可以提高沥青的短期及长期抗老化性能,在延缓沥青老化过程中具有显著优势。

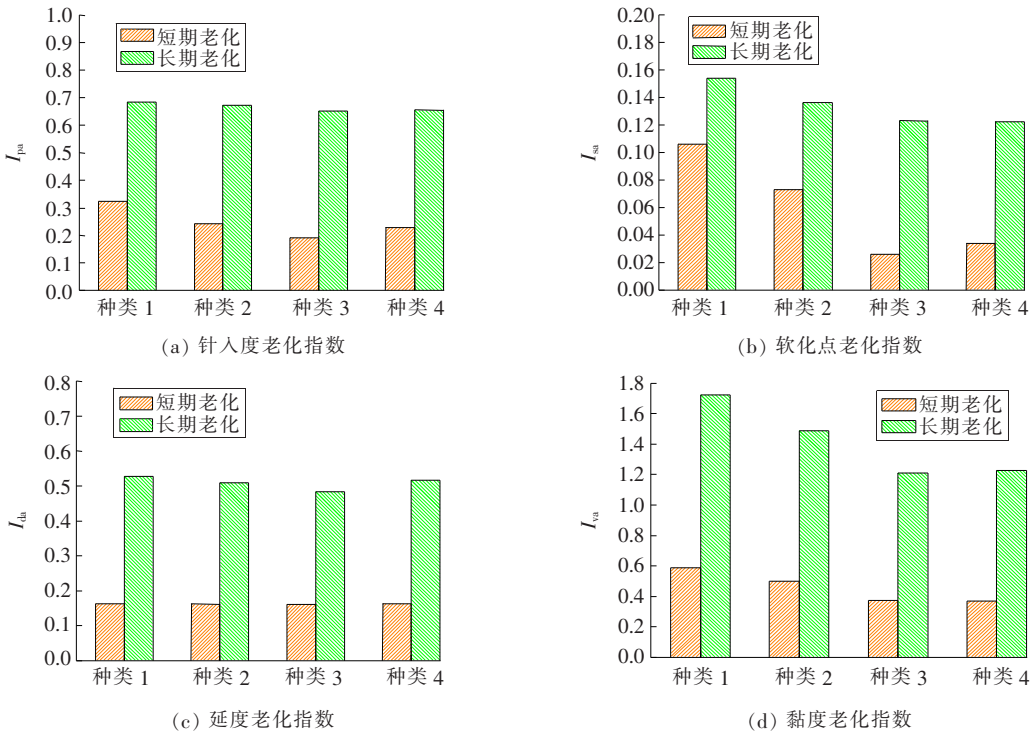


图 2 不同改性沥青老化后的物理老化指数

Fig. 2 Physical aging indexes of different modified asphalt after aging

2.2 老化前后高温流变特性

对基质沥青和纳米碳化硅改性沥青进行 DSR 试验,来评价沥青老化前后的流变特性。根据其他学者的研究成果,60 ℃ 的车辙因子更能反映路面的高温情况,与实际的环境更具有相关性。因此,选择 60 ℃ 的车辙因子来表征不同掺量下的纳米碳化硅改性沥青高温流变特性,试验结果如图 3 所示。

由图 3 可以发现,随着老化程度的加深,基质沥青与纳米碳化硅改性沥青的车辙因子越大,表明抗车辙性能越强。这是由于随着沥青老化的进行,轻质组分如芳香分、饱和分逐渐转变为沥青质,沥青整体变脆变硬。此外,随着纳米碳化硅掺量的增加,车辙因子也在增加,掺入质量分数为 3%、6%、9% 的纳米碳化硅后,未老化时改性沥青的车辙因子较基质沥青增幅分别为 24.0%、31.4%、31.8%;短期老化后增幅分别为 15.4%、19.4%、21.4%;长期老化后增幅分别为 3.6%、8.3%、13.6%。显然,无论老化条件如何,纳米碳化硅改性沥青的车辙因子均比基质沥青的高,这意味着纳米碳化硅提高了沥青的高温性能。另一方面,老化后纳米碳化硅改性沥青的车辙因子的增长幅度越来越小,表明纳米碳化硅可以阻止沥青的老化。

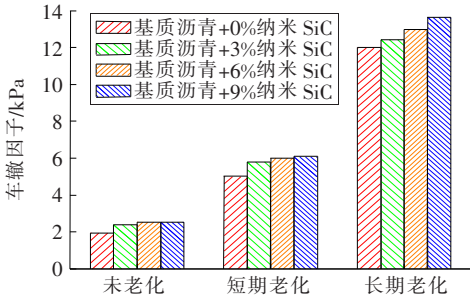


图 3 老化前后沥青车辙因子 (60 ℃)

Fig. 3 The rutting factor before and after aging (60 °C)

为了更加清晰地表征纳米碳化硅改性沥青的抗老化性能,本研究引入了车辙因子老化指数(I_{rfa}),其计算方法如公式(5)所示。

$$I_{\text{rfa}} = \frac{(G^*/\sin\delta)_0}{(G^*/\sin\delta)_a} \tag{5}$$

式中: $(G^*/\sin\delta)_a$ 为老化后的车辙因子; $(G^*/\sin\delta)_0$ 为未老化的车辙因子。

由公式(5)可知, I_{rfa} 越接近 1,沥青的抗老化性能越好,反之代表沥青老化越严重。图 4 所示为沥青短期老化及长期老化后车辙因子老化指数(图中种类 1、种类 2、种类 3、种类 4 的含义同图 2)。从图 4 可以看出,长期老化时,沥青的 I_{rfa} 均低于相同纳米碳化硅掺量下的短期老化时的 I_{rfa} ,表明沥青老化更严重。此外,纳米碳化硅改性沥青的 I_{rfa} 均比基质沥青的高,表明纳米碳化硅改性沥青的抗老化性能比基质沥青的好。另外,无论短期老化还是长期老化,不同纳米碳化硅掺量的改性沥青车辙因子老化指数的变化趋势基本一致,即当纳米碳化硅掺量为 6% 时, I_{rfa} 最大,表明当纳米碳化硅掺量为 6% 时,改性沥青的抗老化性能最佳。

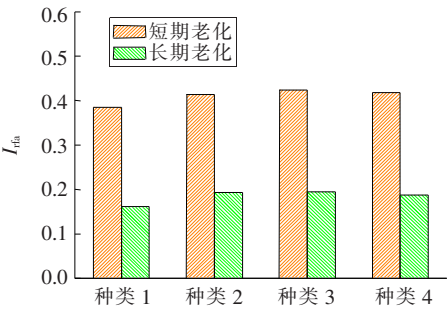


图 4 老化后的车辙因子老化指数

Fig. 4 The rutting factor aging index after aging

2.3 老化前后低温流变特性

对基质沥青和纳米碳化硅改性沥青开展 BBR 试验,来评价其老化前后的低温流变特性。试验结果包括劲度模量 S 及蠕变速率 m 。 S 越小,表明沥青试样的低温性能越好; m 越大,表明蠕变劲度随时间变化得越快,对温度应力的消散能力越好。图 5 和图 6 所示分别为 -12 与 -18 $^{\circ}\text{C}$ 的基质沥青与纳米碳化硅改性沥青的劲度模量 S 与蠕变速率 m 的测试结果。

从图 5~6 可以看出,与未老化的沥青试样相比,短期老化和长期老化后基质沥青及纳米碳化硅改性沥青的 S 均升高, m 均减小,且长期老化后

的趋势更加明显,表明老化降低了沥青的低温抗裂性, S 随着温度的降低不断增大, m 不断减小。此外,随着纳米碳化硅掺量的增大,纳米碳化硅改性沥青的 S 均明显增大, m 明显减小,这表明纳米碳化硅的掺入对沥青胶结料的低温性能有消极影响。

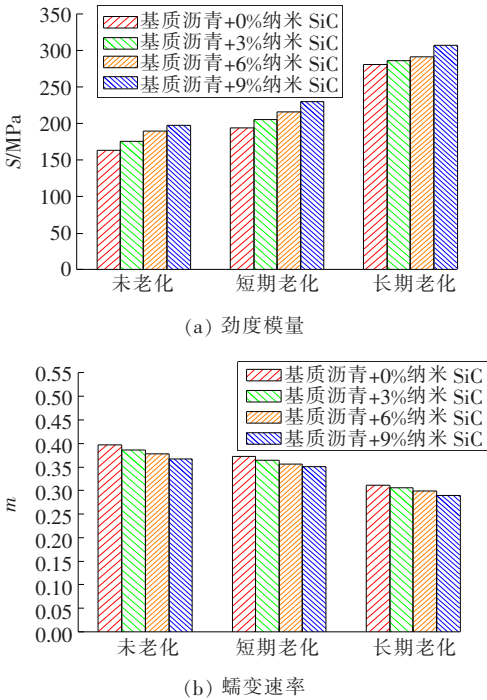


图 5 -12 $^{\circ}\text{C}$ 时沥青的 BBR 测试结果

Fig. 5 BBR test results of asphalt at -12 $^{\circ}\text{C}$

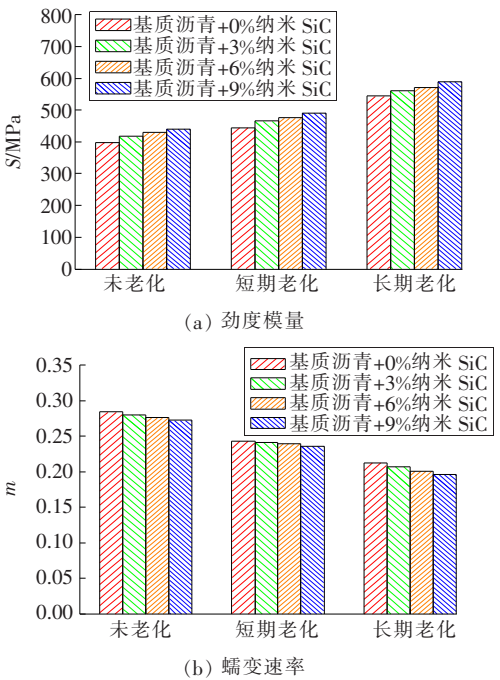


图 6 -18 $^{\circ}\text{C}$ 时沥青的 BBR 测试结果

Fig. 6 BBR test results of asphalt at -18 $^{\circ}\text{C}$

根据崔亚楠等^[12]的研究结果,选择劲度模量老化指数(I_{sma})来表征纳米碳化硅改性沥青的抗老化性能,计算方法如公式(6)所示。

$$I_{sma} = \frac{S_a - S_0}{S_0} \quad (6)$$

式中: S_a 为老化后的劲度模量; S_0 为未老化的劲度模量。

由式(6)可知, I_{sma} 能够反映沥青老化前后劲度模量 S 的变化情况, I_{sma} 越小,表示沥青的抗老化性能越好。各试样短期老化及长期老化后的 I_{sma} 如图 7 所示(图中种类 1、种类 2、种类 3、种类 4 的含义同图 2)。

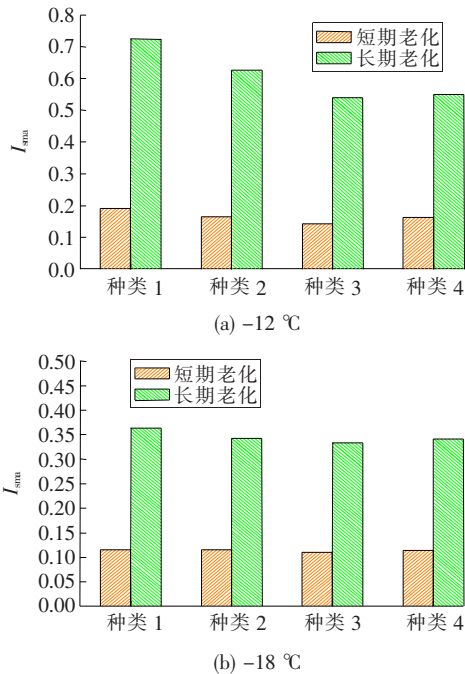


图 7 不同温度下沥青劲度模量老化指数

Fig. 7 The stiffness modulus aging indexes of asphalt at different temperatures

由图 7 可知,长期老化后的沥青 I_{sma} 明显高于短期老化后的 I_{sma} ,这也可以说明 PAV 老化导致沥青老化更严重。 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的 I_{sma} 相比于 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的更低,纳米碳化硅改性沥青的老化指数比基质沥青的低,表明纳米碳化硅可以提高沥青的抗老化性能。不同温度不同掺量下的纳米碳化硅改性沥青劲度模量老化指数的变化趋势一致,均随着纳米碳化硅掺量的增加先降低后升高。以长期老化改性沥青在 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 I_{sma} 变化趋势为例,纳米碳化硅掺量由 0% 增大到 3% , I_{sma} 减小了 13.67% ;当掺量由 3% 增大到 6% 时, I_{sma} 减

小了 13.60% ;当掺量由 6% 增大到 9% 时, I_{sma} 反而上升了 1.81% ,表明纳米碳化硅的最佳掺量为 6% ,此时纳米碳化硅改性沥青抗老化性能最好,这与传统物理性能老化指数以及高温流变老化指数得出的结果一致。另外,当纳米碳化硅掺量为 9% 时,一方面由于掺量较大,造成纳米材料在高速剪切仪中分散不均匀,纳米材料团聚。另一方面,纳米碳化硅和沥青质一样经常会以胶团形式存在,当掺量较大时,其表现出来的胶浆性质可能会造成抗老化性能减弱。

2.4 老化前后微观特性分析

FTIR 可以有效测定物质的官能团,常被用于分析沥青及其老化的微观机理。根据前文得出的结果,选择掺量为 6% 的纳米碳化硅改性沥青进行 FTIR 分析,并与基质沥青进行对照,测试的红外光谱结果如图 8 所示。

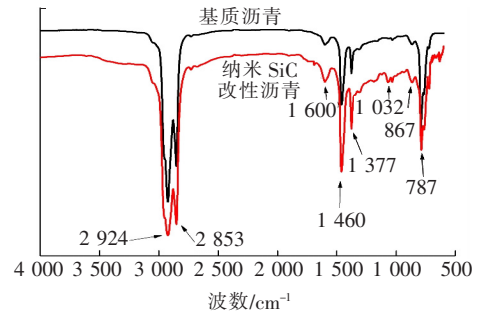


图 8 基质沥青与纳米碳化硅改性沥青的 FTIR 结果

Fig. 8 FTIR results of matrix asphalt and nano-SiC modified asphalt

由图 8 可以看出,纳米碳化硅改性沥青相较于基质沥青并未出现大的特征峰波动,仅在 $1000\sim500\text{ cm}^{-1}$ 特征峰之间出现一些微小的波动,表明纳米碳化硅粉末与基质沥青之间发生了微弱的化学反应;在 $1000\sim500\text{ cm}^{-1}$ 特征峰之间产生了新的官能团,但是含量很少,说明两者之间能够形成稳定结构,且以物理作用为主。

沥青老化后,官能团会发生变化,一些含氧特征官能团的含量会增加。有研究表明,可以采用老化前后 1700 和 1030 cm^{-1} 位置处的羰基($\text{C}=\text{O}$)、亚砷基($\text{S}=\text{O}$)特征峰的相对含量来表征沥青黏结剂的抗老化性能^[10,12]。因此,沥青老化前后的羰基指数(I_c)与亚砷基指数(I_s)分别按公式(7)~(8)计算。

$$I_c = \frac{A_{\text{C}=\text{O}}}{A_{\text{C}-\text{H}}} \quad (7)$$

$$I_s=\frac{A_{S=O}}{A_{C-H}}\tag{8}$$

式中： $A_{C=O}$ 为羰基吸收峰积分面积； $A_{S=O}$ 为亚砷基吸收峰积分面积； A_{C-H} 为饱和 C—H 吸收峰积分面积。

相同老化程度下， I_c 或 I_s 较未老化沥青增长幅度越小，沥青的抗老化性能越好。不同老化程度的基质沥青与纳米 SiC 改性沥青的 I_c 、 I_s 如图 9 所示。

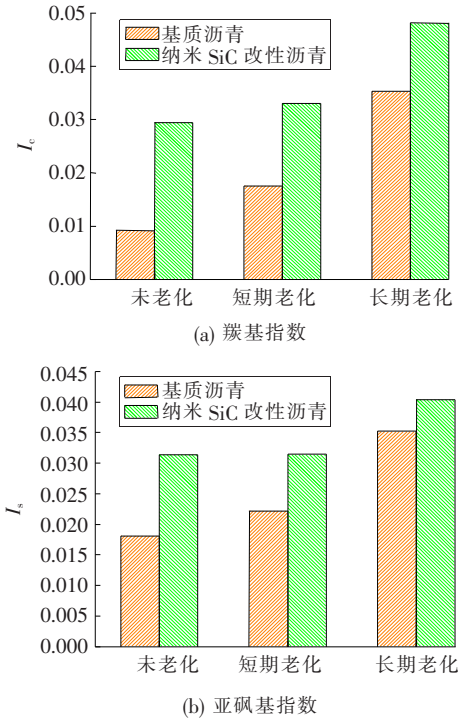


图 9 不同老化条件下羰基指数与亚砷基指数计算结果

Fig. 9 Calculation results of carbonyl index and sulfoxide index at various aging states

从图 9 可以看出，随着老化程度的加深，羰基指数与亚砷基指数不断增加，这是因为在老化过程中官能团与氧结合生成羰基、亚砷基等极性基团，沥青分子间作用力增强，沥青变硬，宏观表现为高温性能的提升和低温抗裂性能的下降。基质沥青的羰基指数从基质沥青到短期老化再到长期老化，增长量分别为 0.008 39、0.026 11，相应的纳米碳化硅改性沥青的增长量为 0.003 56、0.018 63。显然，改性沥青的增长量更少，表明纳米碳化硅改性沥青在老化过程中可以抑制羰基的生成。同样，从图 9(b)也可以看出纳米碳化硅改性沥青的亚砷基指数增幅均比基质沥青的小，表

明其也可抑制亚砷基的生成，抗老化性能更好。

从短期老化和长期老化试样的 FTIR 微观结果来看，纳米碳化硅可以提高沥青的抗老化性能，主要是因为纳米碳化硅粉末颗粒较细，比表面积较大，经过高速剪切机剪切后均匀分散到沥青当中，从而与沥青表面结合能力更强。在热氧老化过程中纳米碳化硅抑制了沥青含氧官能团的生成，阻止了沥青的进一步老化硬化，从而提高了沥青的抗老化能力。

3 讨论

本研究对基质沥青和纳米碳化硅改性沥青进行了未老化、短期老化及长期老化三种情况下的针入度、延度、流值、黏度、高低温流变性能及 FTIR 测试，分析了纳米碳化硅改性沥青的最佳掺量及抗老化性能，本研究认为纳米碳化硅可以提高沥青的抗老化性能，这与孙杰^[11]的部分研究成果相类似，证明了本研究的合理性。本研究采用老化指数的评价方法可以用来表征改性沥青的抗老化特性，从 FTIR 试验结果可以得到纳米碳化硅抗老化特性的微观机理。本研究成果能够为研究人员以及实际工程应用提供借鉴价值。此外，本研究未对改性沥青的疲劳特性进行试验及分析，众所周知，沥青的抗疲劳特性是一关键指标，因此后续将围绕纳米碳化硅改性沥青的抗疲劳特性进行相关工作的研究。

4 结论

本研究分别对基质沥青及不同掺量的纳米碳化硅改性沥青进行了老化前后的传统物理性能、DSR、BBR 以及 FTIR 试验，分析了老化前后各评价指标的变化，对纳米碳化硅改性沥青的抗老化性能及其机理进行了研究，得到如下结论：

1) 纳米碳化硅改性沥青经过老化后，针入度和延度值降低，软化点和黏度值升高，基质沥青的针入度老化指数、软化点老化指数、延度老化指数、黏度老化指数均高于相同老化程度下的纳米碳化硅改性沥青，结果表明纳米碳化硅掺量为 6% 时改性沥青的抗老化性能最佳。

2) 纳米碳化硅改性沥青与基质沥青相比具有

较大的车辙因子与劲度模量,表明纳米碳化硅的掺入可以提高沥青的高温稳定性,但对低温抗裂性能有消极影响。采用车辙因子老化指数与劲度模量老化指数评价纳米碳化硅改性沥青的抗老化性能是可行的,两者的结果均表明纳米碳化硅可以提高沥青的抗老化性能,这与传统物理性能试验结果一致。

3) 从 FTIR 微观试验结果来看,纳米碳化硅在热氧老化过程中,抑制了沥青含氧官能团的生成,阻止了沥青的进一步老化硬化,提高了沥青的抗老化能力。

4) 本研究对纳米碳化硅改性沥青的抗热氧老化性能及机理进行了研究,但缺乏对其抗紫外老化的定性分析,也未对纳米碳化硅改性沥青混合料的老化性能进行评价。因此,下一步将继续研究纳米碳化硅改性沥青的抗紫外老化性能及其在实际工程中的应用。

〔参考文献〕

- [1] 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):241-246. DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.03.050. GUO Shihui,LIU Bing. Effect of nanomaterial combinations on rheological and anti-aging performance of SBS modified asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39 (3): 241-246. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2019.03.050.
- [2] 刘朝晖,廖美捷,柳力,等. 纳米 TiO_2 /MMT/SBR 复合改性沥青抗老化性能评价及机理分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(2):10-17. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.02.003. LIU Zhaohui, LIAO Meijie, LIU li, et al. Aging resistance evaluation and mechanism analysis of nano- TiO_2 /MMT/SBR composite modified asphalt[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(2): 10-17. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.02.003.
- [3] 王春奇,刘展瑞,曾令康,等. 基于 FTIR 技术的沥青老化研究[J]. 公路与汽运,2020(4):58-62. DOI:10.3969/j.issn.1671-2668.2020.04.015. WANG Chunqi, LIU Zhanrui, ZENG Ling kang, et al. Research on asphalt aging based on FTIR technology [J]. Highways & Automotive Applications, 2020 (4): 58-62. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2020.04.015.
- [4] 周志刚,贺文莉,李浩嘉,等. 基于失效温度动态方程的沥青抗老化性能评价[J]. 交通科学与工程,2019,35(4):1-8. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2019.04.001. ZHOU Zhigang, HE Wenli, LI Haojia, et al. Evaluation of the asphalt anti-aging performance based on the failure temperature dynamic equation[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(4): 1-8. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2019.04.001.
- [5] 杨三强,饶奇,史向英. 不同老化程度下沥青流变力学性能[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2019,16(1):22-27. DOI:10.3969/j.issn.1672-9331.2019.01.004. YANG Sanqiang, RAO Qi, SHI Xiangying. Rheological mechanical properties of asphalt under different aging levels[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2019, 16 (1): 22-27. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.01.004.
- [6] 杨小龙,申爱琴,蒋宜馨,等. 基于阻燃抑烟的纳米黏土改性沥青综述[J]. 交通运输工程学报,2021,21(5):42-61. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.05.004. YANG Xiaolong, SHEN Aiqin, JIANG Yixin, et al. Review on nano clay modified asphalt based on flame retardant and smoke suppression[J]. Journal of Traffic and Transportation, 2021 (5): 42-61. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.05.004.
- [7] 白翔宇,吕娜. OMMT/ZnO 纳米复合 SBS、SBR 聚合物改性沥青与混合料性能研究[J]. 公路,2021,66(10):308-314. BAI Xiangyu, LYU Na. Research on performance of OMMT/ZnO nano-composite SBS and SBR polymer modified asphalt and asphalt mixture[J]. Highway, 2021, 66(10): 308-314.
- [8] 贾晓东,彭义雯. 石墨烯纳米片改性沥青的制备及性能研究[J]. 化工新型材料,2020,48(7):244-247, 251. DOI:10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2020.07.055. JIA Xiaodong, PENG Yiwen. Preparation and property analysis of asphalt modified by GNPs[J]. New Chemical Materials, 2020, 48(7): 244-247, 251. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2020.07.055.
- [9] 樊亮,裴金荣,李永振. 纳米 TiO_2 改性沥青的路用性能与抗老化效果研究[J]. 化工新型材料,2019,47

(7):257-261,265.

FAN Liang, PEI Jinrong, LI Yongzhen. Study on road performance and anti-aging effect of nano TiO₂ modified asphalt[J]. New Chemical Materials, 2019, 47(7):257-261,265.

[10] 李增杰,杨仲尼,苏聚卿. 有机化改性纳米碳酸钙对沥青老化性能的影响研究[J]. 公路, 2018, 63(11):259-264.

LI Zengjie, YANG Zhongni, SU Juqing. Impact of organic modified nano-calcium carbonate on aging resistance of asphalt[J]. Highway, 2018, 63(11): 259-264.

[11] 孙杰. SiC 纳米改性沥青及其混合料性能试验研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2017.

SUN Jie. Experimental study on properties of SiC nano-modified asphalt and its mixtures[D]. Changsha:Changsha University of Science & Tecnology, 2017.

[12] 崔亚楠,刘涛. 纳米蒙脱土改性沥青的抗老化性能及老化机理[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(4):626-633. DOI:10. 3969/j. issn. 1007-9629. 2018. 04. 016.

CUI Yanan, LIU Tao. Aging resistance and its mechanism of nano-montmorillonite modified asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(4): 626-633. DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-9629. 2018. 04. 016.

Study on the aging resistance and mechanism of nano-SiC modified asphalt

YAO Zicheng¹, LIN Xiangbo¹, LIU Changwei¹, LIU Kang¹, LI Guangyao²

(1. Qingdao Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Qingdao 266100, China; 2. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] This work aims to study the effect of nano-SiC on aging resistance and micro mechanism of asphalt. [Methods] The rolling thin film over test (RTFOT) and pressure aging vessel (PAV) test were used to conduct short-term and long-term thermal oxygen aging on A-70[#] matrix asphalt and nano-silicon carbide (SiC) modified asphalt with the mass fractions of 3%, 6% and 9%. The traditional physical properties test, dynamic shear rheological test (DSR), bending beam rheometer (BBR) and fourier transform infrared spectrum (FTIR) were carried out on asphalt before and after aging. [Findings] The physical property aging index and rheological aging index results consistently show that the 6% of SiC is the optimum dosage. [Conclusions] The addition of nano-SiC could improve the high-temperature stability and aging resistance of asphalt, but it is detrimental to the low-temperature crack resistance. SiC could effectively inhibit the formation of carbonyl and sulfoxide functional groups in the aging process, preventing the further aging and hardening of asphalt.

Key words: nano-silicon carbide (SiC); modified asphalt; aging resistance; micro mechanism; aging index

Manuscript received: 2022-01-10; **revised:** 2022-07-23; **accepted:** 2022-08-01

Foundation item: Project(2016B41) supported by Science and Technology Program of Shandong Provincial Department of Transportation

Corresponding author: YAO Zicheng(1980—)(ORCID:0000-0003-0239-4480), male, senior engineer, research interest: road engineering materials. E-mail:704354970@qq.com

(责任编辑:刘平;校对:石月珍;英文编辑:田湘)