

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022120724021965

文章编号:1674-599X(2024)01-0001-08

引用格式:金娇,陈晖文,赵文声,等.成核剂改性沥青的制备及性能评价[J].交通科学与工程,2024,40(1):1-8,27.

Citation: JIN Jiao, CHEN Huiwen, ZHAO Wensheng, et al. Preparation and performance evaluation of modified asphalt with nucleating agent[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2024, 40(1): 1-8, 27.

成核剂改性沥青的制备及性能评价

金娇¹, 陈晖文¹, 赵文声^{1,2}, 黄秀娴²

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 呈和科技股份有限公司, 广东 广州 510080)

摘要:为了扩大沥青改性剂的使用范围,并改善现有技术中存在的问题。采用NAB、NAP两种成核剂来制备不同掺量的改性沥青。通过三大指标试验、DSR试验、紫外老化试验、长期老化试验和BBR试验,研究成核剂改性沥青的基本性能、高温流变性能、紫外老化性能、长期压力老化性能和低温流变性能。研究表明:成核剂改性沥青软化点提高12.93%,针入度下降21.60%;成核剂改性沥青高温抗车辙性能较好;其紫外老化指数和长期老化指数远低于基质沥青的,具有较明显的抗老化性能;成核剂改性沥青的低温蠕变劲度模量减小,蠕变速率增大,低温流变性能得到明显改善。成核剂改性沥青明显提高了基质沥青的高温流变性能、抗老化性能和低温流变性能,推荐成核剂最佳掺量为1.0%~2.0%。

关键词:成核剂;改性沥青;高温稳定性;长期老化

中图分类号:U414

文献标志码:A

Preparation and performance evaluation of modified asphalt with nucleating agent

JIN Jiao¹, CHEN Huiwen¹, ZHAO Wensheng^{1,2}, HUANG Xiuxian²

(1.School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Chenghe Technology Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: To broaden the range of asphalt modifiers and improve the existing problems in the present technology, the modified asphalts with different contents were prepared by the NAB and NAP nucleating agents. The basic property, high-temperature rheological property, ultraviolet aging property, long-term pressure aging property, and low-temperature rheological property of nucleating agent modified asphalt were studied by the three index tests, DSR test, ultraviolet aging test, long-term aging test, and BBR test. The results indicate that, the softening point of nucleating agent-modified asphalt increases by 12.73 %, and the penetration decreases by 21.60 %. The nucleating agent modified asphalt shows the good high-temperature rutting resistance. The UV aging indices and long-term aging index of the asphalt with nucleating agent are much lower than those of matrix asphalt, which has significant anti-aging performance. The low-temperature flexibility of nucleating agent-modified asphalt increases, and the low-temperature rheological property is significantly improved.

收稿日期:2022-08-08

基金项目:国家自然科学基金(52174237, 51704040);湖南省杰出青年科学基金(2022JJ10051);湖南创新型省份建设专项(2020RC3039);长沙市科技计划项目(kq2106042)

作者简介:金娇(1988—),女,长沙理工大学副教授,博士生导师。E-mail:jinjiao@csust.edu.cn

The high-temperature rheology, aging resistance, and low-temperature rheology of matrix asphalt are significantly improved by nucleating agent. The recommended optimum content of nucleating agent is 1.0 % ~ 2.0 %.

Key words: nucleating agent; modified asphalt; high temperature stability; long-term aging

改性沥青技术最早的历史可追溯到19世纪初期,当时英国学者提出了聚合物橡胶改性沥青技术^[1]。19世纪50年代之后,日本、美国相继开展针对聚合物改性沥青的研究,虽然没有欧洲起步早,但是发展迅猛,目前已经处于世界领先的水平^[2]。中国从20世纪80年代开始探索道路改性沥青的应用,但是应用的聚合物改性剂品种有限,没有形成完整的聚合物改性技术,也没有实现大规模批量生产^[3]。因此,中国只能采用进口改性沥青建设高等级公路,成本相对较高。

目前,沥青改性剂主要分为聚合物改性剂和非聚合物改性剂两种。根据改性过程中是否发生化学反应,将聚合物改性剂分为物理改性和化学改性,非聚合物改性剂分为矿物改性、非矿物改性^[4]。聚合物改性沥青以其优异性能一直受业界研究者的青睐^[5-7]。制备聚合物改性沥青的方法是将聚合物掺入到熔融状态的基质沥青中,经过高速剪切使其分散均匀,在物理或化学作用下,提高改性沥青各方面的性能^[8-9]。聚合物通常以液体、颗粒或粉末的形式加入到基质沥青中,然后通过剪切、搅拌,制备不同种类、不同含量的聚合物改性沥青^[10]。聚合物在改性沥青中的含量较低、成本合理,因此,在保证改性沥青性能的前提下,聚合物是最具经济效益的传统沥青替代品。

目前,市面上能够大范围应用于沥青路面施工的工业改性剂还很少,且大多数改性剂的价格昂贵、性能不足、生产困难。目前,一般应用的沥青改性剂大多是高分子聚合物。相对基质沥青来说,苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(styrene-butadiene-styrene block copolymer, SBS)、丁苯橡胶(styrene-butadiene rubber, SBR)等改性沥青,虽可以大幅度地改善沥青的高温稳定性和低温抗裂性,但也带来了易老化、降解难、聚合物与沥青相容性差、易发生分层与离析等问题^[11-15]。纳米材料虽然比表面积巨大、粒径小,但是易团聚,导致纳米改性沥青难以同时保证沥青的高低温性能^[16-18]。因此,探寻新型的沥青改性剂,是解决目前所面临问题的

关键。成核剂四氢苯羧酸钙(calcium tetrahydrobenzoate, NAB)和NAP2,2'-亚甲基-双(4,6-二叔丁基苯基磷酸)碱式铝(2,2'-methylene-bis(4,6-di-tert-butylphenyl phosphate) basic aluminum, NAP)可达到塑料制品的增刚增韧效果,其主要成分包含了胶质,其与沥青组分中的树脂相似。为了解决该问题,本研究采用NAB和NAP两种不同的成核剂,将其分别掺入基质沥青中,得到含成核剂的改性沥青,并对成核剂改性沥青的高低温性能和老化性能进行研究,为合理选择成核剂改性沥青提供参考,且对其在沥青路面的应用提供理论依据。

1 材料与试验

1.1 材料与仪器

基质沥青采用厦门华特公司生产的70#道路石油沥青;成核剂采用呈和科技股份有限公司生产的NAB和NAP,外观呈粉末状。成核剂参数具体见表1,性能特点见表2,基质沥青的性能指标见表3。

表1 NAB和NAP基本参数

Table 1 Basic parameters of NAB and NAP

成核剂	成分	分子量
NAB	四氢苯羧酸钙	208.23
NAP	2,2'-亚甲基-双(4,6-二叔丁基苯基磷酸)碱式铝	1 051.25

表2 NAB和NAP性能特点

Table 2 Performance characteristics of the NAB and NAP

成核剂	项目	指标
NAB	白度/ %	≥94.0
	加热减量/ %	≤3.0
	堆积密度/(g·cm ⁻³)	0.2 ~ 0.4
NAP	熔点/ °C	≥210
	加热减量/ %	≤1.0
	堆积密度/(g·cm ⁻³)	0.2 ~ 0.4

表 3 70#道路石油沥青性能指标

Table 3 The performance indexes of 70# road asphalt

基本性能指标	规范要求	测试结果
针入度(25 °C)/(0.1 mm)	60.0 ~ 80.0	61.1
软化点/°C	≥46.0	49.5
延度(15 °C)/cm	≥100	>100
含蜡量/%	≤2.2	1.8

试验采用上海昌吉地质仪器有限公司的SYD-2801针入度仪和SYD-2806G全自动沥青软化点仪、美国Prentex公司的PAV 9500压力老化容器系统、安东帕(Anton Par)公司的MCR 301动态剪切流变仪(dynamic shear rheometer, DSR)、美国Cannon公司的TE-BBR弯曲梁流变仪(bending beam rheometer, BBR)。

1.2 改性沥青制备

将基质沥青在140 °C的烘箱内烘至熔融状态后,分别掺入0.5%、1.0%、2.0%、3.0%的NAB、NAP改性剂,控制温度在140 ~ 155 °C,并以5 000 r/min的转速将沥青剪切1 h,制备出8种不同掺量的成核剂改性沥青。

1.3 沥青老化

参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)^[19]进行改性沥青的短期老化试验。老化后的沥青试样用于紫外老化测试和长期老化测试。采用PAV压力老化系统模拟改性沥青在自然环境中使用5~7 a后的老化程度。采用自制紫外老化系统模拟在自然环境中紫外辐射对改性沥青性能的影响。测试条件:取15.0 g±0.1 g的改性沥青置于直径为85.0 mm,厚0.5 mm的盘中,使其流动展开形成约为2.0 mm的沥青膜,并以80 W/m²的紫外照射强度对沥青试样照射40 h。

1.4 沥青性能测试

参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)^[19]对NAB、NAP改性沥青的常规性能指标进行测试。采用DSR对老化前后的沥青进行性能测试。测试条件为:温度扫描范围40 ~ 90 °C,升温速率为2 °C/min,施加10 rad/s的正弦振荡荷载。采用BBR对长期老化后的沥青样品进行低温流变性能测试。在-12 °C和-18 °C条件下,分别

对沥青试样加载240 s的0.98 ± 0.05 N荷载,并测出加载60 s时沥青的蠕变劲度模量S和蠕变速率m。

2 结果与讨论

2.1 成核剂对沥青性能的影响

分别对基质沥青和掺入0.5%、1.0%、2.0%、3.0%的NAB、NAP改性沥青进行三大指标测试,试验结果见表4。以70#道路石油沥青为基准,根据表4的试验结果,计算成核剂改性沥青三大指标随着掺量增加的变化率,结果见表5。

表 4 成核剂改性沥青三大指标

Table 4 Three main indexes of modified asphalt with nucleating agent

种类	掺量/%	软化点/°C	延度(15 °C)/cm	针入度(25 °C)/(0.1 mm)
基质沥青	0.0	49.5	130.0	61.1
NAB 改性 沥青	0.5	51.8	122.1	55.8
	1.0	52.6	95.6	54.4
	2.0	53.7	68.2	51.1
	3.0	55.7	50.6	47.9
NAP 改性 沥青	0.5	51.7	127.0	56.9
	1.0	53.6	85.8	55.8
	2.0	54.8	64.7	53.8
	3.0	55.8	55.2	48.7

由表4可知,随着NAB、NAP掺量的增加,两种改性沥青的软化点逐渐升高,针入度逐渐下降。这是因为成核剂掺入到沥青后,成核剂吸收了沥青中的部分饱和分与芳香分,使得沥青质的浓度相对增加,稠度增大^[20]。

由表5可知,当NAB、NAP掺量达到3%时,软化点分别提高了12.53%、12.93%,而成核剂改性沥青的延度随着NAB、NAP的增加而逐渐降低。当成核剂改性剂掺量达到3%时,延度的降低超过了50%,这是因为成核剂掺量越大,成核剂吸收沥青中饱和分与芳香分的量越大,改性沥青的硬化效应越大,所以改性沥青的延度会大幅度降低。

表5 成核剂改性沥青三大指标变化率

Table 5 Three main indexes change rate of modified asphalt with nucleating agent

改性剂	掺量/ %	变化率/ %		
		软化点	延度 15 °C	针入度 25 °C
NAB	0.5	4.65	-6.08	-8.67
	1.0	6.26	-26.46	-10.97
	2.0	8.48	-61.08	-16.37
	3.0	12.53	-61.10	-21.60
NAP	0.5	4.44	-2.31	-6.87
	1.0	8.28	-34.00	-8.67
	2.0	10.71	-50.23	-11.95
	3.0	12.93	-57.54	-20.30

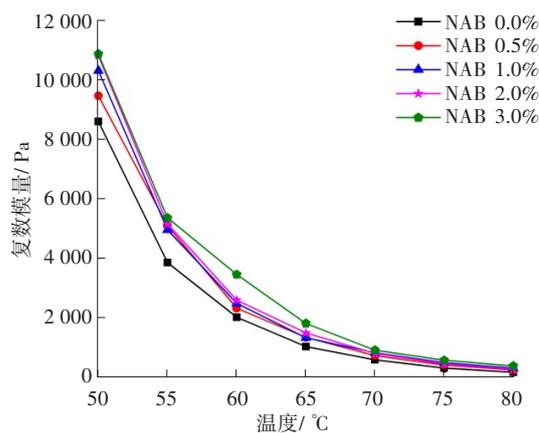
2.2 高温流变性能

采用DSR对70#基质沥青和成核剂改性沥青进行温度扫描,测试不同掺量的NAB、NAP改性沥青的复数模量和车辙因子,其结果如图1~2所示。

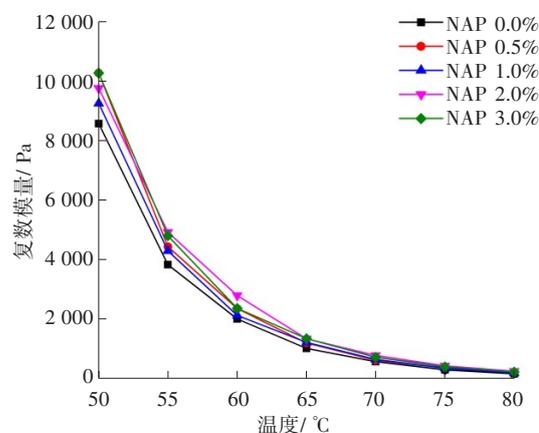
2.2.1 复数剪切模量

复数剪切模量 G^* 用于表征沥青抵抗弹塑性变形的能力。复数剪切模量越大,沥青抵抗变形的能力就越强^[21]。

图1(a)表征不同掺量的NAB改性沥青复数剪切模量 G^* 随温度变化的情况。在相同温度条件下, G^* 随NAB掺量的增加而逐渐升高。这是因为部分NAB成核剂吸收了基质沥青中的某些组分,使得改性沥青的黏稠性明显增强。掺量越大,NAB成核剂吸收的量越大,改性沥青的黏度就越大,这与针入度和软化点试验的结果相互印证。因此,NAB改性剂可以有效提高基质沥青的抗变形能力。图1(b)表征不同掺量的NAP改性沥青复数模量 G^* 随温度变化的情况, G^* 随着NAP掺量的增加呈现出先上升后降低的规律。温度为60 °C时,掺量为2%的NAP改性沥青的 G^* 值最大,其高温抗变形能力最强。这是因为NAP掺量过高,导致NAP在沥青中发生团聚,使得NAP改性沥青的抗变形能力降低。



(a) NAB改性沥青复数模量随温度变化关系



(b) NAP改性沥青复数模量随温度变化关系

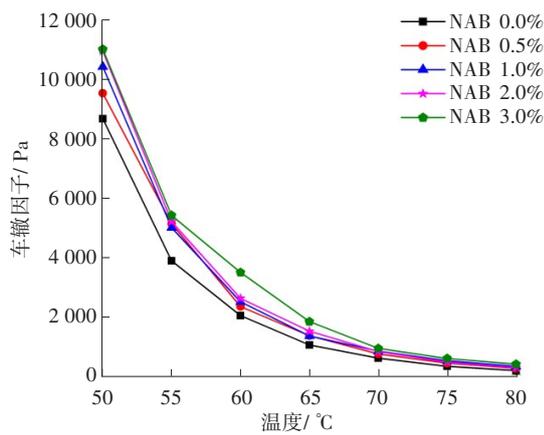
图1 成核剂改性沥青试样复数模量测试结果

Fig. 1 Test results of complex modulus of modified asphalt with nucleating agent

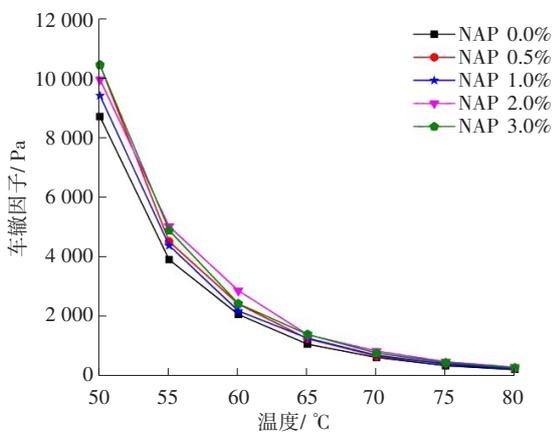
2.2.2 车辙因子

车辙因子用于表征沥青抗车辙能力的强弱。车辙因子越大,抵抗变形能力越强,高温性能越好^[22]。

从图2可以看出,成核剂NAB、NAP均对基质沥青的车辙因子有明显改善。其中,NAB改性沥青的车辙因子的大小关系为NAB掺量为3.0%>NAB掺量为2.0%>NAB掺量为1.0%>NAB掺量为0.5%>NAB掺量为0.0%;NAP改性沥青车辙因子的大小关系为NAP掺量为2.0%>NAP掺量为3.0%>NAP掺量为0.5%>NAP掺量为1.0%>NAP掺量为0.0%。这与复数模量测试结果一致。当NAP掺量为3.0%时,车辙因子明显下降了,这是因为NAP的掺量过高,导致其在沥青中分散不均匀,发生了团聚或离析,使得NAP改性沥青的抗车辙能力减弱,但提高了基质沥青的高温性能。



(a) NAB 改性沥青车辙因子随温度变化关系



(b) NAP 改性沥青车辙因子随温度变化关系

图 2 成核剂改性沥青试样温度扫描测试结果

Fig. 2 Temperature scanning test results of modified asphalt with nucleating agent

2.3 抗老化性能

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)^[19]对基质沥青和成核剂改性沥青进行短期老化试验,并将短期老化后的沥青残留样品进行紫外老化和长期老化试验。采用动态剪切流变仪(dynamic shear rheomete, DSR)对经过紫外老化、长期老化的沥青试样进行温度扫描测试,测出紫外老化、长期老化后的复数剪切模量 G^* ,并计算沥青的老化指数。

2.3.1 紫外老化指数

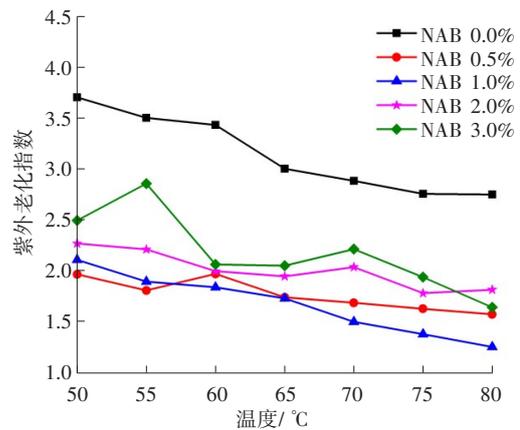
采用 80 W/m^2 的紫外光照强度对短期老化后的成核剂改性沥青进行照射。采用 DSR 技术对经过 40 h 紫外照射的沥青试样进行温度扫描试验,测出各个沥青试样的复数剪切模量 G^* 。本研究采用紫外老化指数来表征沥青抵抗紫外辐射老化能力的

强弱,紫外老化指数为沥青老化前后复数剪切模量的比值。

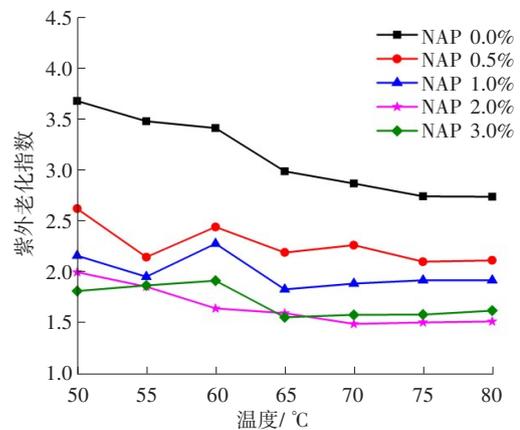
$$\text{紫外老化指数} = \frac{G_{\text{aged}}^*}{G_{\text{fresh}}^*} \quad (1)$$

式中: G_{aged}^* 为沥青老化后的复数剪切模量; G_{fresh}^* 为沥青老化前的复数剪切模量。

各沥青试样的紫外老化指数越接近于 1,表明该试样的紫外老化程度越低。成核剂改性沥青紫外老化程度随温度变化的情况如图 3 所示。



(a) NAB 改性沥青紫外指数随温度变化的关系



(b) NAP 改性沥青紫外指数随温度变化的关系

图 3 成核剂改性沥青紫外老化指数随温度变化关系

Fig. 3 The relationship between the UV aging index of modified asphalt with nucleating agent and temperature

从图 3 可以看出,在相同温度条件下,成核剂改性沥青试样的紫外老化指数都显著低于基质沥青的。从图 3(a)中可以看出,当 NAB 掺量为 0.5% 和 1.0% 时,沥青试样的紫外老化指数最小。这是因为加入了 NAB 改性剂,使得沥青中的油分在受到紫外光照射后吸氧量减少,与老化后的基质沥青相比,

具有足够的柔软性,因此表现出良好的抗老化性能^[23]。随着NAB掺量继续增大,改性沥青的老化指数逐渐升高。这表明NAB改性沥青最佳掺量为0.5%~1.0%。从图3(b)中可以看出,NAP改性沥青的紫外老化指数随着NAP掺量的增大而减小,NAP掺量为2%和3%时,NAP改性沥青试验的紫外老化指数非常接近。这是因为NAP改性剂在沥青中已经达到了平衡,所以NAP改性沥青的最佳掺量为2%。

2.3.2 长期老化指数

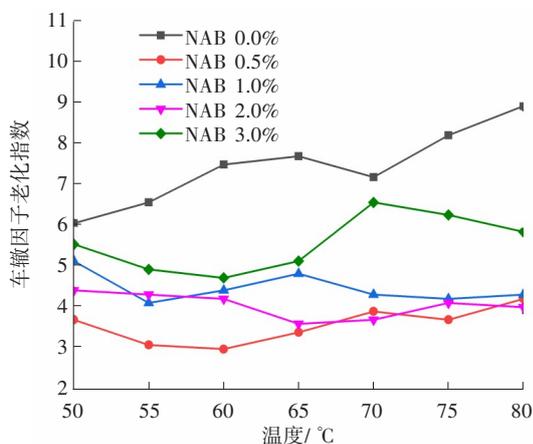
采用压力老化容器 (pressurized aging vessel, PAC),将短期老化后的残留沥青在100 °C、2.1 MPa压力下进行沥青长期老化试验。采用DSR对经过20 h压力老化的沥青试样进行温度扫描试验,测出各个沥青试样的复数剪切模量 G^* 和相位角 δ ,并计算出长期老化后的车辙因子。本研究采用长期老化指数即改性沥青老化前后的车辙因子之比,表征改性沥青抗长期老化能力的强弱。各沥青试样长期老化指数越接近于1,表明该试样的长期老化程度越低。

$$\text{长期老化指数} = \frac{(G^*/\sin\delta)_{\text{aged}}}{(G^*/\sin\delta)_{\text{fresh}}} \quad (2)$$

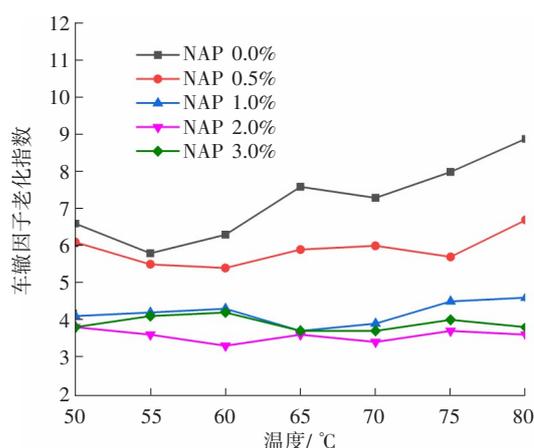
式中: $(G^*/\sin\delta)_{\text{aged}}$ 为沥青老化后的车辙因子; $(G^*/\sin\delta)_{\text{fresh}}$ 为沥青老化前的车辙因子。

成核剂改性沥青长期老化程度随温度变化的情况如图4所示。

在相同温度条件下,成核剂改性沥青的车辙因子老化指数值都显著低于基质沥青的。从图4(a)中可以看出,当NAB掺量为0.5%时,NAB改性沥青具有较好的抗长期老化性能,这与紫外老化试验结果相互印证。



(a) NAB改性沥青长期老化指数与温度的关系



(b) NAP改性沥青长期老化指数与温度的关系

图4 成核剂改性沥青长期老化指数与温度的关系

Fig. 4 The relationship between the long-term aging index of modified asphalt with nucleating agent and temperature

从图4(b)可以看出,当NAP掺量达到2.0%时,改性沥青的车辙老化指数最小,表明紫外老化试验NAP改性沥青的最佳掺量为2.0%,此时NAP改性沥青具有最佳的抗长期老化性能。

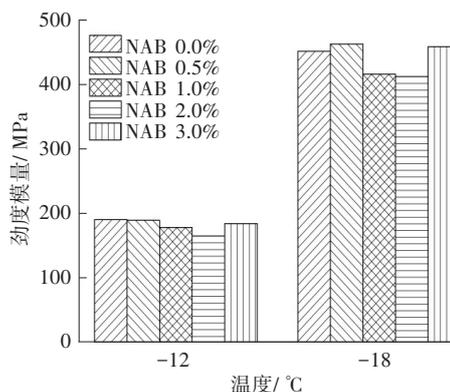
2.4 低温流变性能

沥青路面在低温环境下容易产生开裂的问题,战略公路研究计划 (strategic highway research program, SHRP)提出了利用弯曲梁流变仪 (bending beam rheometer, BBR)测定沥青的低温蠕变劲度 S 和蠕变速率 m ,评价沥青的低温流变性能。 S 值越小, m 值越大,表明改性沥青抵抗低温开裂性能越好。

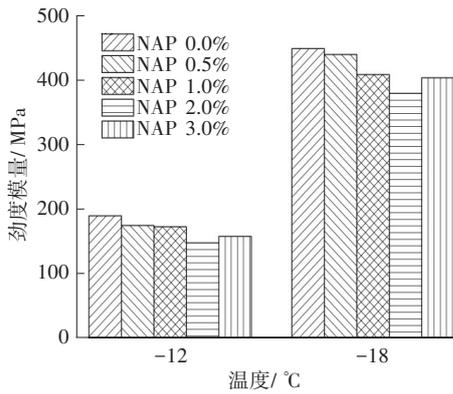
成核剂改性沥青低温流变性能随温度变化的情况如图5~6所示。

从图5~6可以看出:

1) 当温度为-12 °C时,随着成核剂掺量的增加, S 值减小, m 值略有所上升,两者均满足规范^[19]要求。这表明老化后的改性沥青低温性能较好,黏弹性有所提高。



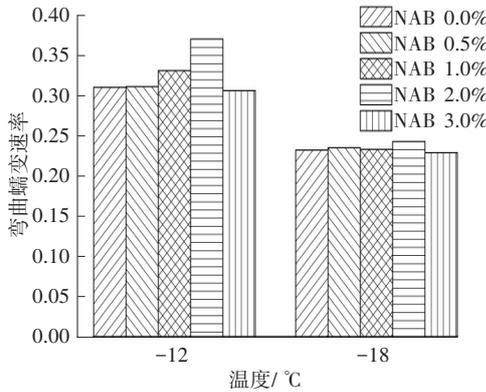
(a) NAB改性沥青劲度模量与温度的关系



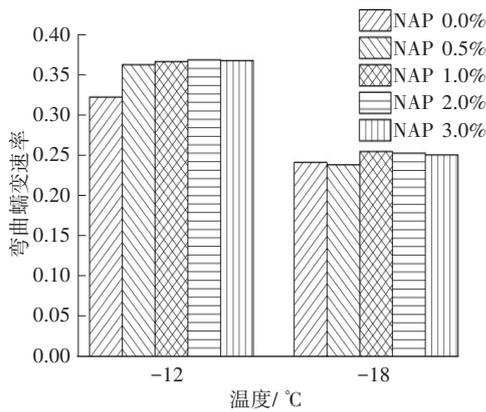
(b) NAP改性沥青劲度模量与温度的关系

图 5 成核剂改性沥青劲度模量与温度的关系

Fig. 5 The relationship between the bending creep stiffness of modified asphalt with nucleating agent and temperature



(a) NAB改性沥青蠕变速率与温度的关系



(b) NAP改性沥青蠕变速率与温度的关系

图 6 成核剂改性沥青蠕变速率与温度的关系

Fig. 6 The relationship between the creep rate of modified asphalt with nucleating agent and temperature

2) 当掺量为 2.0% 时,劲度模量达到最低,表明此时的低温性能最佳。

3) 当温度为 -18°C 时,各样品的 S 值均大于 300 MPa, m 值小于 0.3, 不符合规范^[19]要求。

总体来说,成核剂改性沥青在 -12°C 时的低温流变性能可得到一定提高。这表明 NAB、NAP 改性沥青的低温适用等级为 -12°C 。

3 结论

1) 三大指标和 DSR 试验结果表明, NAB、NAP 改性剂的加入对基质沥青具有显著的增稠作用, 明显提高了基质沥青的高温流变性能。

2) 采用紫外老化试验、长期老化试验后的改性沥青与基质沥青的结果作对比, 发现改性沥青具有较好的抗老化性能。成核剂与塑料领域中的增刚增韧作用相似, 可与沥青中树脂组分共同作用, 导致改性沥青的老化指数远低于基质沥青的。其中, 最佳掺量范围为 1.0% ~ 2.0%。

3) 通过分析老化后改性沥青的 BBR 试验结果发现, 成核剂的加入能够改善沥青的低温流变性能, 验证了成核剂可以提高抗老化能力。

参考文献 (References):

[1] LESUEUR D. The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2009, 145 (1/2): 42-82. DOI: 10.1016/j.cis.2008.08.011.

[2] DARYAEE D, AMERI M, MANSOURKHAKI A. Utilizing of waste polymer modified bitumen in combination with rejuvenator in high reclaimed asphalt pavement mixtures [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 235: 117516. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117516.

[3] 金鑫, 郭乃胜, 尤占平, 等. 聚氨酯改性沥青研究现状及发展趋势[J]. *材料导报*, 2019, 33(21): 3686-3694. DOI: 10.11896/cldb.18090011.

JIN Xin, GUO Naisheng, YOU Zhanping, et al. Research and development trends of polyurethane modified asphalt[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(21): 3686-3694. DOI: 10.11896/cldb.18090011.

[4] 肖凤, 邓星鹤. 沥青改性剂研究进展[J]. *中国胶黏剂*, 2020, 29(9): 61-66. DOI: 10.13416/j.ca.2020.09.015.

- XIAO Feng, DENG Xinghe. Research progress of asphalt modifier[J]. *China Adhesives*, 2020, 29(9): 61-66. DOI: 10.13416/j.ca.2020.09.015.
- [5] 王海成, 金娇, 刘帅, 等. 环境友好型绿色道路研究进展与展望[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(7): 2137-2169. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.07.004.
- WANG Haicheng, JIN Jiao, LIU Shuai, et al. Research progress and prospect of environment-friendly green road [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(7): 2137-2169. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.07.004.
- [6] BEHNOOD A, MODIRI G M. Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders[J]. *European Polymer Journal*, 2019, 112: 766-791. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2018.10.049.
- [7] 魏建国, 时松, 周育名, 等. 多聚磷酸改性沥青流变性能[J]. *交通运输工程学报*, 2019, 19(6): 14-26. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2019.06.002.
- WEI Jianguo, SHI Song, ZHOU Yuming, et al. Rheological property of polyphosphoric acid modified asphalt [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2019, 19(6): 14-26. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2019.06.002.
- [8] MA J M, NAWARATHNA H M C, HESP S A M. On the sustainable use of recycled plastics in flexible asphalt pavements [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 359: 132081. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132081.
- [9] 尹建伟, 薛冰. WTR/APAO复合改性沥青混合料性能研究[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 19(1): 27-33. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.004.
- YIN Jianwei, XUE Bing. Study on performance of WTR/APAO composite modified asphalt mixture [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2022, 19(1): 27-33. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.004.
- [10] 姚文霞. 废胶粉与废塑料复合改性沥青混合料性能研究[J]. *交通科学与工程*, 2021, 37(2): 8-13. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.002.
- YAO Wenxia. Performance study of waste tire rubber and waste plastic composite modified asphalt [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2021, 37(2): 8-13. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.002.
- [11] BINTI J I, MANIAM S, GIUSTOZZI F. Influence of compatibilizers on the storage stability of hybrid polymer-modified bitumen with recycled polyethylene [M]// *Plastic Waste for Sustainable Asphalt Roads*. Amsterdam: Elsevier, 2022: 215-232. DOI: 10.1016/b978-0-323-85789-5.00011-3.
- [12] 金大中, 钱国平, 白献萍. 纳米改性沥青材料研究进展 [J]. *化工新型材料*, 2019, 47(12): 32-36.
- JIN Dazhong, QIAN Guoping, BAI Xianping. Progress in nano modified asphalt material [J]. *New Chemical Materials*, 2019, 47(12): 32-36.
- [13] REN S S, LIU X Y, WANG H P, et al. Evaluation of rheological behaviors and anti-aging properties of recycled asphalts using low-viscosity asphalt and polymers[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 253: 120048. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120048.
- [14] LIN P, YAN C Q, HUANG W D, et al. Rheological, chemical and aging characteristics of high content polymer modified asphalt [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 207: 616-629. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.086.
- [15] VAMEGH M, AMERI M, CHAVOSHIAN N S F. Performance evaluation of fatigue resistance of asphalt mixtures modified by SBR/PP polymer blends and SBS [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 209: 202-214. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.111.
- [16] 吴寅瑞, 金娇, 陈柏臻, 等. 坡缕石在建材领域的应用研究进展 [J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(8): 2436-2441. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2018.08.015.
- WU Yinrui, JIN Jiao, CHEN Bozhen, et al. Review on the application of palygorskite in building materials [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 37(8): 2436-2441. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2018.08.015.
- [17] 高及阳, 曾梦澜, 孙志林. 改性纳米 SiO₂ 对再生沥青胶结料性能的影响 [J]. *土木工程学报*, 2019, 52(3): 120-128. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2019.03.012.
- GAO Jiyang, ZENG Menglan, SUN Zhilin. Effects of nano-SiO₂ with modified surface on properties of recycled asphalt binder [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(3): 120-128. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2019.03.012.

- [17] 吴帅峰, 蔡红, 严俊, 等. 强夯沉降模型及参数特征分析研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(7): 112-118. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.07.015.
WU Shuaifeng, CAI Hong, YAN Jun, et al. Dynamic compaction settlement model and parameter characteristic analysis [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(7): 112-118. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.07.015.
- [18] 梁永辉, 王卫东, 冯世进, 等. 高填方机场湿陷性粉土地基处理现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(6): 1027-1035. DOI: 10.11779/CJGE202206006.
LIANG Yonghui, WANG Weidong, FENG Shijin, et al. Field study on treatment of collapsible silt for high-fill airport project [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(6): 1027-1035. DOI: 10.11779/CJGE202206006.
- [19] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000: 19-50.
SHEN Zhujiang. Theoretical soil mechanics [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2000: 19-50.
- [20] 田野. 以顶面回弹模量为目标的铁路货场地基换填方法研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(1): 58-64. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220409007.
TIAN Ye. Study on the method for ground replacement in railway freight yard aiming at resilient modulus of top surface[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2023, 20(1): 58-64. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220409007.
- (责任编辑:欧兆虎;校对:罗容;英文编辑:杜雪明)
-
- (上接第8页)
- [18] YU H N, BAI X P, QIAN G P, et al. Impact of ultraviolet radiation on the aging properties of SBS-modified asphalt binders [J]. Polymers, 2019, 11(7): 1111. DOI: 10.3390/polym11071111.
- [19] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Test procedures for asphalt and asphalt mixture in highway engineering: JTG E20—2011 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [20] LIANG X M, YU X, CHEN C, et al. Towards the low-energy usage of high viscosity asphalt in porous asphalt pavements: a case study of warm-mix asphalt additives [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: e00914. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e00914.
- [21] 刘涛, 郭乃胜, 金鑫, 等. 聚氨酯固-固相变材料改性沥青的流变性能与改性机理[J]. 中国公路学报, 2023, 36(1): 16-26. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2023.01.002.
LIU Tao, GUO Naisheng, JIN Xin, et al. Rheological properties and modified mechanism of polyurethane solid-solid phase change materials modified asphalt [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(1): 16-26. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2023.01.002.
- [22] 金娇, 高玉超, 李锐, 等. 有机蒙脱土改性沥青抗老化性及其分子模拟试验[J]. 中国公路学报, 2022, 35(12): 24-35. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.12.003.
JIN Jiao, GAO Yuchao, LI Rui, et al. Experiment of aging resistance and molecular simulation of organic montmorillonite modified asphalt [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(12): 24-35. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.12.003.
- [23] XU X, GUO H Y, WANG X F, et al. Physical properties and anti-aging characteristics of asphalt modified with nano-zinc oxide powder [J]. Construction and Building Materials, 2019, 224: 732-742. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.097.
(责任编辑:罗容;校对:欧兆虎;英文编辑:陈璐)