

doi:10.3969/j.issn.1006-8023.2022.06.018

纳米 CaCO_3 /SBS 复合改性沥青及混合料性能研究

程培峰,李世为,张展铭,杨宗昊

(东北林业大学 土木工程学院,哈尔滨 150040)

摘 要:为改善 SBS(苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物)与基质沥青的相容性,充分发挥出 SBS 应有的改性效果,进一步提高 SBS 改性沥青的高温性能和抗老化性能,选择纳米 CaCO_3 对 SBS 改性沥青进行复合改性。通过三大指标试验、多重应力蠕变恢复试验(Multiple Stress Creep Recovery Test,MSCR)、弯曲蠕变劲度试验(Bending Beam Rheometer Test,BBR)和温度扫描试验(Temperature Scanning Test,TS)分析不同掺量的纳米 CaCO_3 对 SBS 改性沥青物理性能、高温流变性能、低温流变性能和抗老化性能的影响,综合考虑各掺量纳米 CaCO_3 对 SBS 改性沥青性能的影响效果,推荐纳米 CaCO_3 的合理掺量;通过离析试验对比分析 SBS 改性沥青与纳米复合改性沥青的相容性;通过车辙试验、小梁弯曲试验、浸水马歇尔试验及冻融劈裂试验,研究纳米复合改性沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性。研究表明,纳米 CaCO_3 能够改善 SBS 改性沥青的高温性能和抗老化性能,综合考虑性能影响效果,建议复合改性沥青中纳米 CaCO_3 的合理掺量为 4%;纳米 CaCO_3 可以有效改善 SBS 与沥青的相容性;与 SBS 改性沥青混合料相比,纳米复合改性沥青混合料具有更加优异的高温稳定性,水稳定性略有提升。此研究结果表明,纳米 CaCO_3 /SBS 复合改性沥青及混合料综合性能较好,更适合应用于我国南方炎热地区。

关键词:纳米 CaCO_3 ;SBS;复合改性沥青;流变性能;沥青混合料;路用性能

中图分类号:U414

文献标识码:A

文章编号:1006-8023(2022)06-0137-09

Study on the Property of Nano CaCO_3 /SBS Composite Modified Asphalt and Mixture

CHENG Peifeng, LI Shiwei, ZHANG Zhanming, YANG Zonghao

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract:In order to improve the compatibility of SBS(styrene-butadiene-styrene block copolymer) polymer and base asphalt, give full play to the modified effect of SBS and further improve the high-temperature and anti-aging properties of SBS modified asphalt, nano CaCO_3 was chosen to modify SBS modified asphalt. The effects of different amount of nano CaCO_3 on physical properties, high temperature rheological properties, low temperature rheological properties and anti-aging properties of SBS modified asphalt were analyzed through three indexes tests, multiple stress creep recovery test(MSCR), bending beam rheometer test(BBR) and temperature scanning test(TS). Considering the effect of nano CaCO_3 on the performance of SBS modified asphalt, the reasonable content of nano CaCO_3 was recommended. The compatibility of SBS modified asphalt and nano composite modified asphalt was compared and analyzed by segregation test. Through rutting test, trabecular bending test, immersion Marshall test and freeze-thaw splitting test, the high-temperature stability, low-temperature crack resistance and water stability of nano composite modified asphalt mixture were studied. The results showed that, nano CaCO_3 can improve the high-temperature and anti-aging properties of SBS modified asphalt. Considering the effect of performance impact comprehensively, it was suggested that the reasonable content of nano CaCO_3 in composite modified asphalt was 4%. Nano CaCO_3 can effectively improve the compatibility between SBS and asphalt. Compared with SBS modified asphalt mixture, nano composite modified asphalt mixture had better high-temperature stability and slightly improved water stability. The results showed that the comprehensive performance of nano CaCO_3 /SBS composite modified asphalt and mixture was good, which was more suitable for application in hot areas in the South of China.

Keywords:Nano CaCO_3 ; SBS; composite modified asphalt; rheological properties; asphalt mixture; road performance

收稿日期:2022-03-07

基金项目:黑龙江省交通运输厅科技项目(201943219101)

第一作者简介:程培峰,博士,教授。研究方向为路基路面工程与道路工程材料。E-mail:chengpeifeng@nefu.edu.cn

引文格式:程培峰,李世为,张展铭,等. 纳米 CaCO_3 /SBS 复合改性沥青及混合料性能研究[J]. 森林工程,2022,38(6):137-145.

CHENG P F, LI S W, ZHANG Z M, et al. Study on the property of nano CaCO_3 /SBS composite modified asphalt and mixture[J]. Forest Engineering, 2022, 38(6): 137-145.

0 引言

道路材料是影响道路服务质量和使用寿命的关键因素,沥青材料因具有良好的特性被广泛应用于道路工程中^[1]。为提升沥青路面路用性能,在沥青中添加改性材料已然成为了发展趋势^[2-3]。聚合物改性剂 SBS(苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物)可以提升沥青路面的路用性能,在高等级公路沥青路面中被大量采用^[4]。但 SBS 与沥青的相容性不佳,使 SBS 改性效果下降,沥青容易出现抗老化性能不足的问题^[5-6]。近年来,纳米材料因其具有诸多优良特性被应用于各个领域。有关研究表明,纳米材料可以较好地融于沥青中,能够在沥青中形成稳定的结构进而改善沥青结合料的宏观性能^[7-8]。

纳米 CaCO₃ 是一种应用前景广阔的纳米材料,具有优良的补强能力,且造价低,在橡胶、造纸等产业中广泛应用^[9]。近年来,有学者研究了纳米 CaCO₃ 作为沥青改性剂的可行性。杨仲尼等^[10]研究了纳米 CaCO₃ 对沥青流变特性的影响,试验结果表明纳米 CaCO₃ 对改善沥青高温稳定性起到积极作用,而对沥青低温性能影响的效果不显著;李增杰等^[11]对沥青进行薄膜老化试验和压力老化试验,证明了纳米 CaCO₃ 能够改善基质沥青的抗老化性能;李诗琦等^[12]通过室内试验对纳米 CaCO₃ 沥青混合料路用性能进行了研究,结果表明纳米 CaCO₃ 可以改善基质沥青混合料的高温稳定性、水稳定性和抗变形能力。

本文以纳米 CaCO₃/SBS 复合改性沥青及混合料作为研究对象,针对复合改性沥青的物理性能、高温流变性能、低温流变性能、抗老化性能和相容性进行试验分析,并对混合料的高温抗车辙性能、低温抗裂性能和抗水损害性能进行试验评价,以探究纳米 CaCO₃ 对 SBS 改性沥青及混合料性能的影响规律。

1 原材料及试验方案

1.1 原材料

(1)SBS 改性沥青:试验用 SBS 改性沥青由山东

某沥青加工厂生产,SBS 质量分数为 4%,等级为 I-C 级,主要技术指标见表 1。

(2)纳米 CaCO₃:采用上海某公司产品,常温下为白色粉末状固体,主要技术指标见表 2。

表 1 SBS 改性沥青主要技术指标
Tab. 1 Main technical index of SBS modified asphalt

试验项目 Test projects	试验结果 Test results	技术要求 Technical standard
针入度/(25 ℃ ,0.1 mm) Penetration	73.8	60~80
延度/(5 ℃ ,cm) Ductility	38.6	≥30
软化点/℃ Softening point	69.5	≥55
黏度/(135 ℃ ,Pa·s) Viscosity	0.45	≤3
弹性恢复率/(25 ℃ ,%) Rate of elastic recovery	80.0	≥65

表 2 纳米 CaCO₃ 主要技术指标
Tab. 2 Main technical index of nano CaCO₃

试验项目 Test projects	试验结果 Test results	技术要求 Technical standard
平均粒径/mm Average particle size	35.0	≤60
比表面积/(m ² ·g ⁻¹) Specific surface area	32.0	≥20
水分(%) Water content	0.4	≤0.5
白度 Whiteness	95.0	≥93
pH	9.0	≤9.5

(3)混合料级配:采用 AC-16 型沥青混合料,级配组成见表 3。粗集料、细集料材质为玄武岩,矿粉材质为石灰岩。由混合料配合比设计确定 SBS 改性沥青混合料及纳米复合改性沥青混合料的最佳沥青用量分别为 4.7%、5.0%。

1.2 纳米 CaCO₃ 复合改性沥青的制备

将 SBS 改性沥青在 160 ℃ 的条件下加热至熔融状态,首先使用搅拌机以 800 r/min 搅拌沥青,

表 3 AC-16 沥青混合料级配组成
Tab. 3 Aggregate gradation of AC-16

筛孔/mm Sieves size	19.00	16.00	13.20	9.50	4.75	2.36	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075
通过率(%) Passing rate	100.0	95.0	84.0	70.0	48.0	34.0	24.5	17.5	12.5	9.5	6.0

按照沥青质量的 2%、4%、6%、8% 缓慢加入纳米 CaCO_3 ,待沥青表面无气泡后,使用高速剪切仪对其进行剪切,剪切速率为 5 000 r/min,剪切时间为 30 min,制得纳米 CaCO_3 /SBS 复合改性沥青,同时取一份未掺入纳米 CaCO_3 的 SBS 改性沥青进行同样条件下的搅拌剪切处理,以此作为试验用 SBS 改性沥青。

1.3 试验方法

(1)三大指标试验:按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的试验方法进行。

(2)流变性能试验:采用 Anton Paar 公司生产的 MCR302 型号的动态剪切流变仪,试件的直径为 25 mm,与试验板的间隙为 $1.0 \text{ mm} \pm 0.005 \text{ mm}$,采用温度扫描(TS)控制应变模式,加载频率为 10 rad/s,温度范围为 52 ~ 76 $^{\circ}\text{C}$,温度梯度为 6 $^{\circ}\text{C}$;沥青弯曲蠕变劲度试验(BBR)用的弯曲梁流变仪是由美国 CANNON 公司生产,沥青试件尺寸长、宽、高分别为 101.6、12.7、6.4 mm,测试温度为 -12、-18、-24 $^{\circ}\text{C}$;沥青多重应力蠕变恢复试验(MSCR)同样采用动态剪切流变仪,试件的直径为 25 mm,与试验板的间隙为 $1.0 \text{ mm} \pm 0.005 \text{ mm}$,在控制应变模式下进行加载,频率为 10 rad/s,温度范围为 52 ~ 76 $^{\circ}\text{C}$,温度梯度为 6 $^{\circ}\text{C}$,应力水平为 0.1 kPa 和 3.2 kPa。

(3)离析试验:将加热至熔融状态的沥青加入直径为 25 mm、高度为 140 mm 的离析管中,将离析管封闭后放入 160 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中储存 48 h,测定离析管顶部和底部沥青的软化点之差。

2 沥青试验结果与分析

2.1 物理性能分析

通过针入度、延度和软化点 3 个试验指标对沥青的物理性能进行评价。测试 SBS 改性沥青和 4 种纳米 CaCO_3 掺量的复合改性沥青的三大指标,具体试验结果如图 1—图 3 所示。

由图 1 可知,随着纳米 CaCO_3 掺量的增加,复合改性沥青的针入度数值逐渐下降,针入度的下降意味着材料稠度的提高,说明纳米 CaCO_3 能够使 SBS 改性沥青的抗变形能力增强。就变化趋势来看,当纳米 CaCO_3 掺量由 2% 增加至 4% 时,复合改性沥青的针入度下降了 0.36 mm,下降幅度最大;当纳米 CaCO_3 掺量由 4% 增加至 8% 时,复合改性沥青的针入度下降了 0.18 mm,下降幅度放缓。说明纳

米 CaCO_3 掺量小于 4% 时,纳米 CaCO_3 掺量的增加对复合改性沥青针入度的影响效果显著,当纳米 CaCO_3 掺量大于 4% 时,虽然针入度仍在降低,但影响效果减弱。

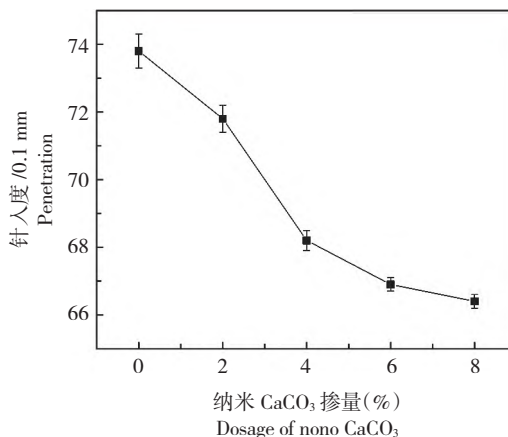


图 1 纳米 CaCO_3 的掺量对沥青针入度的影响

Fig. 1 Effect of nano CaCO_3 dosage on penetration of asphalt

由图 2 可知,随着纳米 CaCO_3 掺量的增加,复合改性沥青的延度呈现下降趋势,低温抗变形能力变差,说明纳米 CaCO_3 对 SBS 改性沥青的低温性能产生一定的负面作用。就变化趋势来看,当纳米 CaCO_3 掺量由 0 增加至 6% 时,纳米复合改性沥青的延度下降幅度相对较缓;当纳米 CaCO_3 掺量由 6% 增加至 8% 时,复合改性沥青的延度下降了 2.6 cm,下降幅度变大。说明当纳米 CaCO_3 掺量小于 6% 时,纳米 CaCO_3 掺量的增加对复合改性沥青延度的影响效果相对较小,当纳米 CaCO_3 掺量大于 6% 时,复合改性沥青的延度降幅较大。

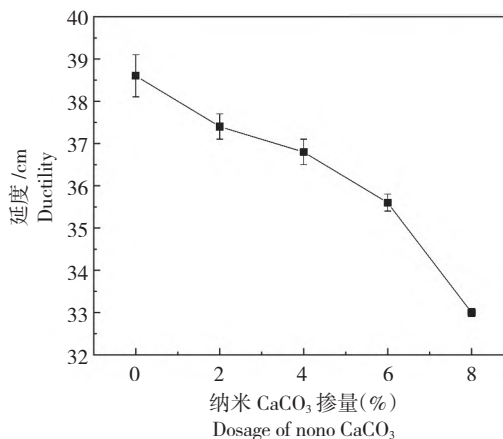


图 2 纳米 CaCO_3 的掺量对沥青延度的影响

Fig. 2 Effect of nano CaCO_3 dosage on ductility of asphalt

由图 3 可知,随着纳米 CaCO_3 掺量的增加,复合改性沥青的软化点逐渐升高,说明纳米 CaCO_3 能够改善 SBS 改性沥青的高温性能。就变化趋势来看,当纳米 CaCO_3 掺量由 0 增加至 2%,由 2% 增加到 4% 时,复合改性沥青的软化点上升明显,分别上

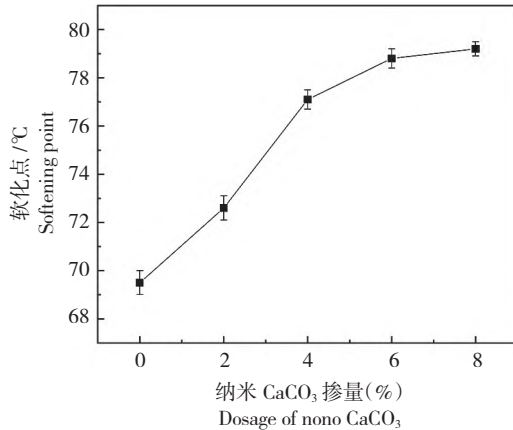
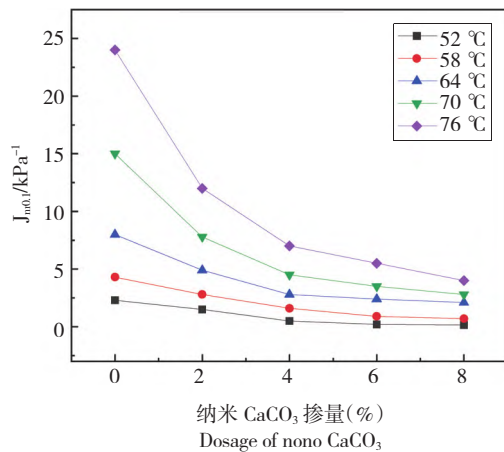


图 3 纳米 CaCO_3 的掺量对沥青软化点的影响

Fig. 3 Effect of nano CaCO_3 dosage on softening point of asphalt



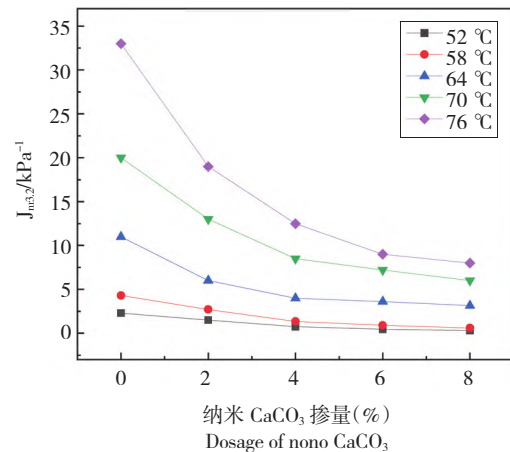
(a) 0.1 kPa 应力等级
(a) 0.1 kPa stress level

升了 $3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$; 当纳米 CaCO_3 掺量由 4% 增加至 8%, 复合改性沥青的软化点仅上升了 $2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 上升趋势放缓。说明当纳米 CaCO_3 掺量小于 4% 时, 纳米 CaCO_3 掺量的增加对复合改性沥青软化点的影响效果显著, 当纳米 CaCO_3 掺量大于 4% 时, 对软化点的影响效果减弱。

2.2 流变性能分析

2.2.1 高温性能分析

改性沥青的可恢复变形和不可恢复变形可表征其高温性能^[13]。相关研究表明, MSCR 试验的应力和应变的范围较大, 能够使聚合物内部结构发生变化, 因此可以对聚合物改性沥青的性能进行客观评价^[14]。该试验评价聚合物改性沥青的高温性能的指标主要有: 不可恢复蠕变柔量 (J_{nr}) 和蠕变恢复率 (R)。 J_{nr} 能够表征沥青的残余变形, J_{nr} 越小, 沥青的残余变形越小, 说明在高温条件下, 沥青具有更好的抗变形能力。纳米 CaCO_3 的掺量对沥青 J_{nr} 的影响情况如图 4 所示。



(b) 3.2 kPa 应力等级
(b) 3.2 kPa stress level

图 4 纳米 CaCO_3 的掺量对沥青 J_{nr} 的影响

Fig. 4 Effect of nano CaCO_3 dosage on J_{nr} of asphalt

由图 4 可知, 在相同的温度条件下, 沥青在 0.1 kPa 和 3.2 kPa 应力等级下的 J_{nr} 随着纳米 CaCO_3 掺量的增加而逐渐降低, 说明纳米 CaCO_3 的加入促进了 SBS 改性沥青高温下抗变形能力的提高。就变化趋势来看, 当纳米 CaCO_3 的掺量小于 4% 时, J_{nr} 下降的幅度较大, 当掺量超过 4% 时, J_{nr} 下降的幅度放缓。以温度为 $64\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的试验结果为例, 纳米 CaCO_3 掺量由 0 增加至 4%, $J_{nr,0.1}$ 和 $J_{nr,3.2}$ 分别降低了 5.2 kPa^{-1} 和 6.8 kPa^{-1} , 纳米 CaCO_3 掺量由 4% 增加至 8%, $J_{nr,0.1}$

和 $J_{nr,3.2}$ 分别降低了 0.7 kPa^{-1} 和 1.2 kPa^{-1} , 说明过大的纳米 CaCO_3 掺量不能对提升沥青高温性能起到明显的效果, 与沥青软化点试验反映的结果一致。在相同温度及纳米 CaCO_3 掺量的条件下, 改性沥青在 3.2 kPa 应力等级下的 J_{nr} 高于 0.1 kPa 应力等级下的 J_{nr} , 原因是高应力导致沥青产生了较大的形变, 随着荷载的累积, 沥青会产生较大的变形。同一种沥青在相同的应力等级下, 温度越高, 沥青的 J_{nr} 越大, 说明沥青高温抗永久变形能力随温度升

高而逐渐降低,表现为改性沥青对高温具有一定敏感性,在高温下更容易变形。

沥青的变形可分为2部分,即弹性变形和塑性变形。蠕变恢复率(R)是除去外力后的可恢复应变与加载时的最大应变之比。 R 可以较好地判断沥青

弹性变形的强弱。一般来说, R 越大,说明沥青在荷载累积作用的影响下弹性变形越大,累积应变越小,其高温抗车辙能力就越强。纳米 CaCO_3 的掺量对沥青 R 的影响情况如图5所示。

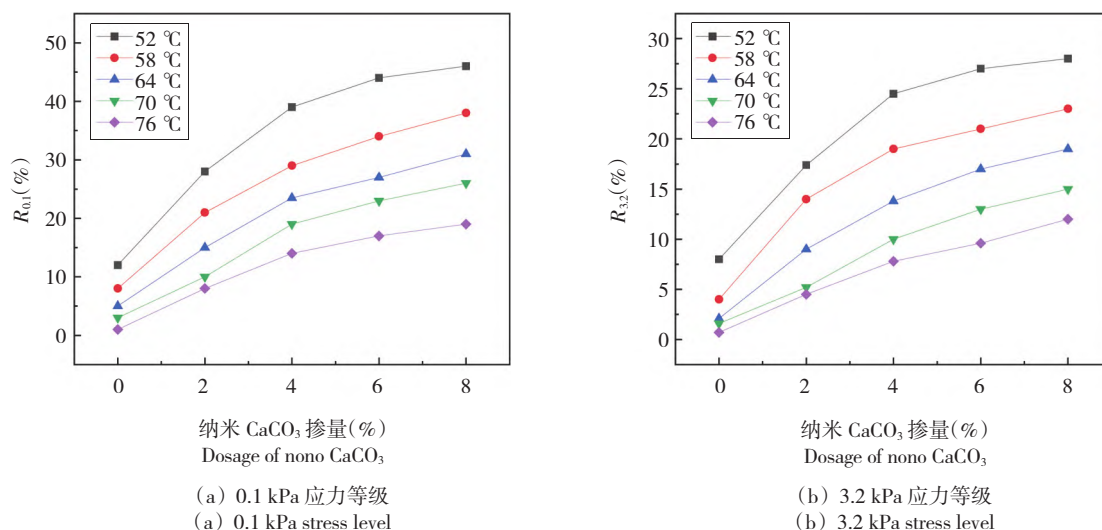


图5 纳米 CaCO_3 的掺量对沥青 R 的影响

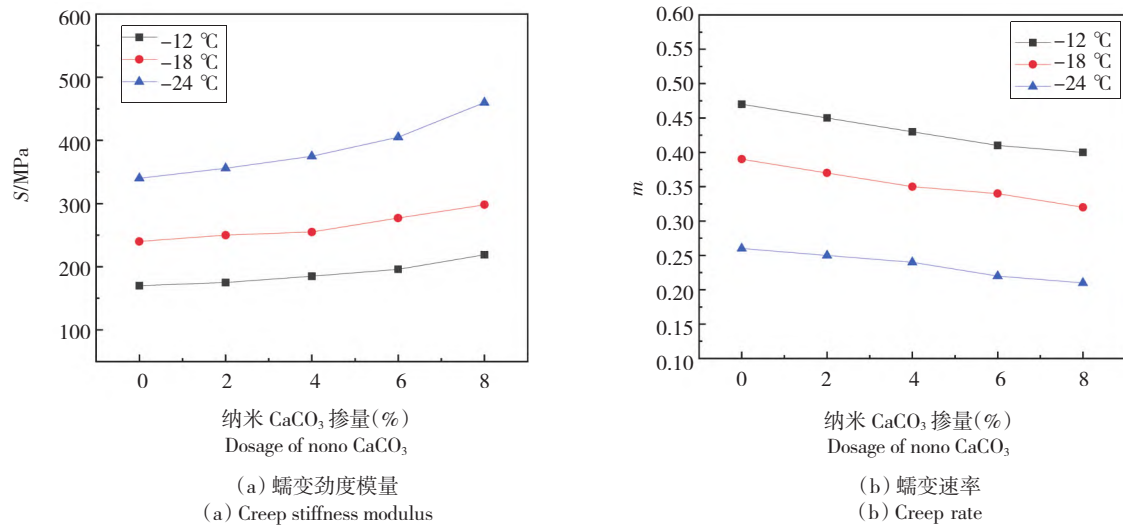
Fig. 5 Effect of nano CaCO_3 dosage on R of asphalt

由图5可知,在相同的温度条件下,各个沥青在0.1 kPa和3.2 kPa应力等级下的 R 均随着纳米 CaCO_3 掺量的增加而逐渐增大,说明纳米 CaCO_3 能够有效地增加SBS改性沥青的弹性变形,降低黏性变形,进而表现为高温变形恢复能力提高。就变化趋势来看,当纳米 CaCO_3 的掺量小于4%时, R 增大的幅度较大,当掺量超过4%时, R 增大的幅度放缓。以温度为64 °C的试验结果为例,纳米 CaCO_3 掺量由0增加至4%, $R_{0.1}$ 和 $R_{3.2}$ 分别增大了18.5%和11.7%,纳米 CaCO_3 掺量由4%增加至8%, $R_{0.1}$ 和 $R_{3.2}$ 分别增大了7.5%和5.2%,说明纳米 CaCO_3 掺量过大不能对提升沥青高温性能起到明显的效果。随着温度的升高,改性沥青在2种应力等级下的 R 均逐渐减小,这表明在高温的影响下,改性沥青的黏弹性组成发生改变,对高温抗变形能力和变形恢复能力均产生负面影响;在相同温度及纳米 CaCO_3 掺量的条件下, R 随应力水平的提高而减小,在相同应力等级及纳米 CaCO_3 掺量的条件下, R 随温度的提高而同样减小,这证明了在研究应力和温度对沥青抗变形能力的影响时,二者具有等效性。

2.2.2 低温性能分析

对沥青试样进行BBR试验,采用蠕变劲度模量(S)和蠕变速率(m)对沥青的低温性能进行评价。 S 表征沥青对恒定载荷的抵抗能力, m 表征荷载作用时劲度的变化率,二者能够反映温度和时间对沥青低温流变性能的影响^[15]。 S 越小, m 越大,说明沥青在低温条件下柔性越好,其抗低温开裂性能越好。纳米 CaCO_3 的掺量对沥青 S 和 m 的影响情况如图6所示。

由图6可知,在相同的温度条件下,随着纳米 CaCO_3 掺量的增加,沥青的 S 提高, m 降低,说明纳米 CaCO_3 会对SBS改性沥青的低温抗变形能力产生一定不利影响。以温度为-18 °C的试验结果为例,相较于SBS改性沥青,纳米 CaCO_3 掺量为8%的复合改性沥青的 S 仅提高了58 MPa, m 仅降低了0.07,说明纳米 CaCO_3 虽然减弱了SBS沥青的低温性能,但影响程度不大。在相同的纳米 CaCO_3 掺量下,温度越低, S 越大, m 越小,说明低温使沥青柔性降低,易发生开裂,当试验温度从-18 °C下降到-24 °C时, S 和 m 变化幅度加大,说明改性沥青对低温有一定敏感性。

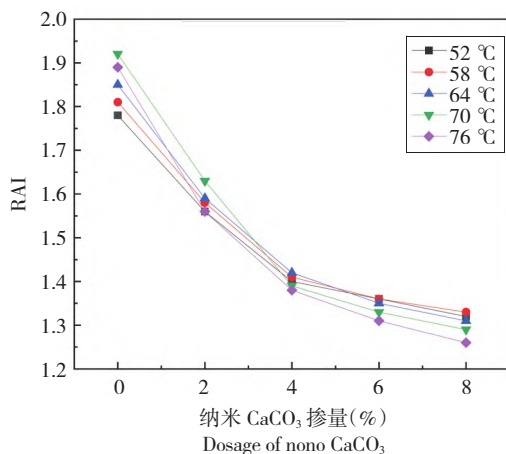
图 6 纳米 CaCO_3 的掺量对沥青 S 和 m 的影响Fig. 6 Effect of nano CaCO_3 dosage on S and m of asphalt

2.3 抗老化性能分析

为了研究纳米 CaCO_3 /SBS 复合改性沥青的抗老化性能,本文对沥青试样进行短期热氧老化,对老化前后的沥青试样进行温度扫描试验(TS),采用车辙因子老化指数(RAI,公式中为 R_{AI})作为评价指标。 R_{AI} 按公式(1)计算。 R_{AI} 越小,沥青性能受老化的影响越小,抗老化性能越好^[16]。纳米 CaCO_3 的掺量对沥青 R_{AI} 的影响情况如图 7 所示。

$$R_{AI} = \frac{G^*/\sin\delta}{G_0^*/\sin\delta_0} \quad (1)$$

式中: $G^*/\sin\delta$ 为沥青老化后的车辙因子; $G_0^*/\sin\delta_0$ 为沥青老化前的车辙因子。

图 7 纳米 CaCO_3 的掺量对沥青 R_{AI} 的影响Fig. 7 Effect of nano CaCO_3 dosage on R_{AI} of asphalt

由图 7 可知,在同一温度下,随着纳米 CaCO_3 掺量的增加,沥青的 R_{AI} 逐渐降低,说明沥青抗老化性能逐渐升高,纳米 CaCO_3 有助于提升 SBS 改性沥青的抗老化性能。就变化趋势来看,当纳米 CaCO_3 的掺量小于 4% 时, R_{AI} 降低的幅度较大,当掺量超过 4% 时, R_{AI} 降低的幅度放缓。以温度为 64 °C 的试验结果为例,当纳米 CaCO_3 掺量由 0 增加至 4% 时,复合改性沥青的 R_{AI} 降低了 0.43,降低的幅度较大,当纳米 CaCO_3 掺量由 4% 增加至 8% 时,复合改性沥青的 R_{AI} 降低了 0.11,降低的幅度放缓。说明当纳米 CaCO_3 掺量小于 4% 时,纳米 CaCO_3 掺量的增加对复合改性沥青抗老化性能的改善效果较为显著。

2.4 合理掺量确定

上文对 SBS 改性沥青和 4 种掺量的纳米 CaCO_3 复合改性沥青进行三大指标试验、MSCR 试验、BBR 试验和老化前后的 TS 试验。分析结果显示,纳米 CaCO_3 对 SBS 改性沥青的物理性能、高低温流变性能、抗老化性能均有影响,综合考虑各试验结果,推荐出纳米 CaCO_3 /SBS 复合改性沥青中纳米 CaCO_3 的合理掺量。

对于针入度指标,当纳米 CaCO_3 掺量小于 4% 时,纳米 CaCO_3 掺量的增加对复合改性沥青针入度的影响效果显著;对于延度指标,当纳米 CaCO_3 掺量小于 6% 时,纳米 CaCO_3 掺量的增加对复合改性沥青延度的影响效果相对较小;对于软化点指标,当纳米 CaCO_3 掺量小于 4% 时,纳米 CaCO_3 掺量的

增加对复合改性沥青软化点的影响效果显著。

对于高温流变性能,当纳米 CaCO₃ 掺量小于 4%时,纳米 CaCO₃ 掺量的增加对复合改性沥青高温抗变形能力影响较大。对于低温流变性能,纳米 CaCO₃ 会对 SBS 改性沥青的低温抗变形能力产生一定不利影响,但影响程度较小。

对于抗老化性能,当纳米 CaCO₃ 掺量小于 4%时,纳米 CaCO₃ 掺量的增加对复合改性沥青抗老化性能的改善效果较为显著。

综上,考虑纳米 CaCO₃ 掺量对复合改性沥青性能的影响效果,建议复合改性沥青中纳米 CaCO₃ 的合理掺量为 4%。

2.5 相容性分析

SBS 改性剂与沥青的相容性不佳,导致 SBS 改性沥青在使用过程中易发生离析,使沥青的性能变差^[17]。为此,有必要对其相容性进行分析研究。

通过离析试验,测定沥青试样顶部与底部软化点的差值评价沥青的相容性。规范规定,沥青顶部与底部软化点之差(Δ*T*)小于 2.5℃,说明沥青具有较好的相容性。SBS 改性沥青和纳米 CaCO₃ 掺量为 4%的复合改性沥青的离析试验结果见表 4。

表 4 离析试验结果

Tab. 4 Results of segregation test

沥青种类 Kind of asphalt	顶部软化点 Softening point at the top	底部软化点 Softening point at the bottom	Δ <i>T</i> ℃
SBS 改性沥青 SBS modified asphalt	72.3	69.2	3.1
复合改性沥青 Composite modified asphalt	78.0	76.8	1.2

由表 4 可知,SBS 改性沥青顶部与底部软化点之差为 3.1℃,不符合规范要求;纳米 CaCO₃ 掺量为 4%的复合改性沥青顶部与底部软化点之差为 1.2℃,符合规范要求,较 SBS 改性沥青降低了 61.2%,说明纳米 CaCO₃ 能够有效改善 SBS 改性沥青的相容性。2 种沥青顶部软化点高于底部软化点,原因是沥青的密度大于 SBS 聚合物的密度,部分未与沥青较好相容的 SBS 聚合物浮于沥青的顶部。

3 沥青混合料试验结果与分析

3.1 高温稳定性分析

当路面温度升高到一定程度,再加上车辆荷载

作用,沥青混合料中的沥青会开始软化,甚至流动,导致路面强度下降,产生局部变形,例如车辙、拥包等^[18]。目前,车辙试验因其技术成熟、可模拟实际路面环境情况被普遍地应用于评定沥青混合料的高温稳定性。本文对 2 种改性沥青混合料进行车辙试验,并进行对比。采用轮碾成型法制备了尺寸为 300 mm×300 mm×50 mm 的沥青混合料车辙板,在自动车辙仪上进行试验,试验结果见表 5。

由表 5 可知,SBS 改性沥青混合料和纳米复合改性沥青混合料的车辙动稳定度均满足规范要求;由上文对沥青性能的研究可知,纳米 CaCO₃ 能够改善 SBS 改性沥青的高温性能,通过沥青混合料车辙试验可知,相较于 SBS 改性沥青混合料,纳米复合改性沥青混合料具有更好的高温性能,动稳定度相比于 SBS 改性沥青混合料提高了约 23.4%,证明了纳米 CaCO₃ 对 SBS 改性沥青及其混合料高温性能的改善作用具有一致性,原因是纳米 CaCO₃ 具有较高的表面活性,能够吸附沥青和 SBS 聚合物,使复合改性沥青混合料形成更加稳定的整体,提升了其高温稳定性。

表 5 车辙试验结果

Tab. 5 Results of wheel track rutting test 次·mm⁻¹

沥青种类 Kind of asphalt	动稳定度 Dynamic stability	规范要求 Requirements of standard
SBS 改性沥青 SBS modified asphalt	5 083	>2 400
复合改性沥青 Composite modified asphalt	6 271	>2 400

3.2 低温抗裂性分析

在我国,特别是我国北方大部分地区,良好的低温抗裂性是沥青混合料应当具备的重要性能之一。沥青混合料的低温性能表现为其抗拉强度和抗变形能力。通常情况下,混合料的抗弯拉强度和最大破坏弯拉应变越大,累积应力增加得越慢,说明材料的低温性能越好^[19]。本文采用国内常用的低温小梁弯曲试验来对比评价 2 种改性沥青混合料的低温抗裂性,试验结果见表 6。

由表 6 可知,纳米复合改性沥青混合料较 SBS 改性沥青混合料的抗弯拉强度和最大破坏弯拉应变略有降低,降低比例分别为 3.1%和 2.6%,2 种沥青混合料的最大破坏弯拉应变均满足规范规定的不小于 2 800 με 的要求。劲度模量反映了材料的

应力-应变关系,对于沥青材料而言,在低温条件下,劲度模量越小,松弛能力越强,低温性能更优异。相较 SBS 改性沥青混合料,复合改性沥青混合料的劲度模量增大了 2.9%。上述分析表明,纳米 CaCO_3 对 SBS 改性沥青混合料的低温性能有一定不利影响,但影响程度较小。

表 6 低温小梁弯曲试验结果

Tab. 6 Results of low temperature trabecular bending test

沥青种类 Kind of asphalt	弯拉强度/MPa Tensile strength	最大弯拉应变/ μe Maximum bending tensile strain	劲度模量/MPa Stiffness modulus
SBS 改性沥青 SBS modified asphalt	10.34	4 153.73	2 488.67
复合改性沥青 Composite modified asphalt	10.02	4 045.69	2 561.71

3.3 水稳定性分析

路面在服役过程中,因气温的变化,环境中的水分会发生冻融循环,加之车辆荷载的反复作用,水分受到动水压力或抽吸压力而进入沥青与集料的结合界面,会减弱沥青与集料的黏结作用,导致集料从混合料中脱离出来,形成松散、坑槽等病害^[20]。本文采用浸水马歇尔试验与冻融劈裂试验来对比评价 2 种改性沥青混合料的水稳定性,试验结果见表 7—表 8。

表 7 浸水马歇尔试验结果

Tab. 7 Results of water-immersed Marshall test

沥青种类 Kind of asphalt	马歇尔稳定度/kN (浸水 0.5 h) Marshall stability (Immersion for 0.5 h)	马歇尔稳定度/kN (浸水 48 h) Marshall stability (Immersion for 48 h)	残留稳定度(%) Residual stability
SBS 改性沥青 SBS modified asphalt	10.78	9.18	85.20
复合改性沥青 Composite modified asphalt	13.56	12.22	90.10

表 8 冻融劈裂试验结果

Tab. 8 Results of freeze-thaw indirect tensile strength test

沥青种类 Kind of asphalt	冻融前劈裂强度/MPa Indirect tensile strength before freezing and thawing	冻融后劈裂强度/MPa Indirect tensile strength after freezing and thawing	冻融劈裂强度比(%) Tensile strength rate
SBS 改性沥青 SBS modified asphalt	0.99	0.83	83.90
复合改性沥青 Composite modified asphalt	0.95	0.85	89.50

由表 7—表 8 可知,2 种沥青混合料浸水 48 h 的马歇尔稳定度小于浸水 0.5 h 的马歇尔稳定度,说明浸水时间与水损害程度呈正相关关系。2 种沥青混合料的残留稳定度均大于 85%,符合规范要求,相比于 SBS 改性沥青混合料,纳米复合改性沥青混合料的残留稳定度提升约 4.9%。2 种沥青混合料冻融后劈裂强度小于冻融前劈裂强度,证明冻融循环会对沥青混合料水稳定性产生不利影响。纳米复合改性沥青混合料冻融前后劈裂强度相较于 SBS 改性沥青混合料均有所降低,2 种沥青混合料的残留稳定度均大于 80%,符合规范要求,相比于 SBS 改性沥青混合料,纳米复合改性沥青混合料的残留稳定度提升约 5.6%,说明纳米 CaCO_3 能够改善 SBS 改性沥青混合料的水稳定性。

4 结论

(1) 纳米 CaCO_3 能够提高 SBS 改性沥青的软化点,降低针入度和延度;纳米 CaCO_3 可增强 SBS 改性沥青的弹性变形,在掺量小于 4% 时,纳米 CaCO_3 掺量的增加对复合改性沥青高温流变性能的改善作用较明显;纳米 CaCO_3 对复合改性沥青低温流变性能的影响较小。

(2) 纳米 CaCO_3 能够改善 SBS 改性沥青的抗老化性能,在掺量小于 4% 时,纳米 CaCO_3 掺量的增加对复合改性沥青抗老化性能的改善效果较为显著;纳米 CaCO_3 可以有效改善 SBS 与沥青的相容性;综合性能影响效果,建议复合改性沥青中纳米 CaCO_3 的合理掺量为 4%。

(3) 相较于 SBS 改性沥青混合料,复合改性沥青混合料动稳定度提高了 23.4%,高温稳定性较优异;低温抗裂性略有降低,但远高于规范要求;残留稳定度和冻融劈裂强度比分别提升了 4.9% 和 5.6%,水稳定性良好。

【参 考 文 献】

- [1] 张海涛,程培峰. 路面结构理论与材料[M]. 北京:科学出版社,2014.
ZHANG H T, CHENG P F. Pavement structure theory and materials[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [2] 程培峰,郑春萌,张展铭,等. 废旧口罩熔喷布对沥青及混合料性能影响研究[J]. 森林工程,2021,37(6):126-134.
CHENG P F, ZHENG C M, ZHANG Z M, et al. Study on the influence of melt-blown cloth of waste mask on the performance of asphalt and mixture[J]. Forest Engineering, 2021, 37(6): 126-134.

- [3] 石振武,王彬骅,张海涛. LKW-II 温拌剂对橡胶/SBS 复合改性沥青流变性能的影响[J]. 森林工程, 2021, 37(6): 90-98.
- SHI Z W, WANG B H, ZHANG H T. Influence of LKW-II warm mix additive on rheological performance of rubber/SBS composite modified asphalt[J]. Forest Engineering, 2021, 37(6): 90-98.
- [4] 王鹏,刘鹏,王健,等. 碳纳米管对 SBS 改性沥青流变性能的影响研究[J]. 山东建筑大学学报, 2019, 34(5): 22-26.
- WANG P, LIU P, WANG J, et al. Effect of Carbon nanotubes on rheological properties of SBS modified asphalt[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2019, 34(5): 22-26.
- [5] 鲁玉莹,余黎明,方洁,等. 聚合物改性沥青的研究进展[J]. 化工新型材料, 2020, 48(4): 222-225, 230.
- LU Y Y, YU L M, FANG J, et al. Research development of polymer modified asphalt[J]. New Chemical Materials, 2020, 48(4): 222-225, 230.
- [6] 曹嘉琦,王志祥. SBS 改性剂老化对改性沥青性能的影响[J]. 合成材料老化与应用, 2021, 50(5): 27-31, 89.
- CAO J Q, WANG Z X. Effect of aging of SBS modifier on properties of SBS modified asphalt[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2021, 50(5): 27-31, 89.
- [7] CHENG P F, ZHANG Z M, YANG Z H, et al. Evaluation of self-healing performance and mechanism analysis of nano-montmorillonite-modified asphalt[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2022, 15(4): 876-888.
- [8] LIAO M J, LIU Z H, GAO Y L, et al. Study on UV aging resistance of nano- TiO_2 /montmorillonite/styrene-butadiene rubber composite modified asphalt based on rheological and microscopic properties [J]. Construction and Building Materials, 2021, 301: 124108.
- [9] 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 D Z, QIAN G P, BAI X P. Progress in nano modified asphalt material[J]. New Chemical Materials, 2019, 47(12): 32-36.
- [10] 杨仲尼,李增杰,李帅. 纳米碳酸钙对道路石油沥青流变特性的影响[J]. 中外公路, 2019, 39(4): 254-258.
- YANG Z N, LI Z J, LI S. Effect of nano- CaCO_3 on rheological properties of road petroleum asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(4): 254-258.
- [11] 李增杰,杨仲尼,苏聚卿. 有机化改性纳米碳酸钙对沥青抗老化性能的影响研究[J]. 公路, 2018, 63(11): 259-264.
- LI Z J, YANG Z N, SU J Q. Impact of organic modified nano-calcium carbonate on aging resistance of asphalt[J]. Highway, 2018, 63(11): 259-264.
- [12] 李诗琦,李睿,易强. 纳米碳酸钙改性沥青混合料路用性能评价研究[J]. 石油沥青, 2021, 35(5): 39-45.
- LI S Q, LI R, YI Q. Study on the road performance of nano- CaCO_3 modified asphalt mixture[J]. Petroleum Asphalt, 2021, 35(5): 39-45.
- [13] BINTI JOOHARI I, GIUSTOZZI F. Oscillatory shear rheometry of hybrid polymer-modified bitumen using multiple stress creep and recovery and linear amplitude sweep tests [J]. Construction and Building Materials, 2022, 315: 125791.
- [14] D'ANGELO J A. The relationship of the MSCR test to rutting [J]. Road Materials and Pavement Design, 2009, 10(sup1): 61-80.
- [15] 银花,李凯. 基于弯曲梁流变试验和黏弹性理论评价沥青低温性能研究[J]. 功能材料, 2021, 52(10): 10157-10165.
- YIN H, LI K. Research on evaluation of asphalt low temperature performance based on rheological test of curved beam and viscoelastic theory[J]. Journal of Functional Materials, 2021, 52(10): 10157-10165.
- [16] 肖志薇. 热分析方法在纳米材料/SBS 改性沥青中的性能研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2019.
- XIAO Z W. Study on the performance of nanomaterials/SBS modified asphalt by thermal analysis method[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019.
- [17] 余永宏. 基质沥青与 SBS 改性剂的相容性分析[J]. 公路, 2020, 65(11): 324-327.
- YU Y H. Compatibility analysis of base asphalt and SBS modifier [J]. Highway, 2020, 65(11): 324-327.
- [18] 肖学良. 碳纳米管/SBS 复合改性沥青及混合料性能研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2017.
- XIAO X L. Properties research of carbon nanotubes/SBS composite modified asphalt and mixtures[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2017.
- [19] 李艺铭. 树脂橡胶改性沥青及其混合料耐候性的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2021.
- LI Y M. Research on weather resistance of resin rubber modified asphalt binder and its mixture[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021.
- [20] 张展铭. 多聚磷酸与丁苯橡胶复合改性沥青及混合料性能研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2019.
- ZHANG Z M. Research on properties of asphalt and mixture modified by polyphosphoric acid and styrene-butadiene rubber[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2019.