

面向寒冷地区的预溶胀SBS改性沥青的制备及其改性效果

崔林¹, 蔺斌², 周张峰², 陈琳涛³, 徐娟⁴, 尚义⁵

¹长安大学理学院, 陕西 西安

²中交一航局第五工程有限公司, 河北 秦皇岛

³天津市政工程设计研究总院有限公司, 天津

⁴西安长大公路工程检测中心有限公司, 陕西 西安

⁵长安大学公路学院, 陕西 西安

收稿日期: 2026年6月29日; 录用日期: 2026年7月21日; 发布日期: 2026年7月31日

摘要

为满足寒冷地区对沥青材料低温性能、老化性能与储存稳定性等的要求, 提出一种预溶胀苯乙烯-丁二烯-苯乙烯(SBS)改性剂技术。本文通过芳烃油预溶胀SBS颗粒, 形成均匀流动态的预溶胀SBS改性剂(PS-SBS); 采用简单机械搅拌工艺将其与基质沥青混合, 制备出性能优异的改性沥青; 研究了PS-SBS的制备方法、不同加工参数对改性沥青性能的影响; 将PS-SBS与传统SBS改性沥青进行了对比研究, 并系统分析了PS-SBS改性沥青的老化特性与低温流变性能。结果表明, 以芳烃油:SBS质量比为0.8:1, 80℃下溶胀60 h, PS-SBS达到最佳溶胀状态; PS-SBS改性沥青的最佳制备工艺是140℃, 1000 r/min条件下搅拌1.0 h, 再保持140℃发育1.0 h。PS-SBS改性沥青具有更低的粘度、更好的储存稳定性以及更优的低温性能与老化性能, 但其高温性能受到一定影响。FM与FTIR分析表明, 预溶胀工艺通过改善SBS的溶胀与分散状态提高了沥青相容性, 其改性机理以物理共混为主。本研究为寒冷地区SBS改性沥青的制备与性能优化提供了理论依据和技术支撑。

关键词

预溶胀SBS改性剂, 预溶胀SBS改性沥青, 改性沥青制备工艺, 寒冷地区, 沥青性能

Preparation and Modification Effect of Pre-Swelling SBS Modified Asphalt for Cold Regions

Lin Cui¹, Bin Lin², Zhangfeng Zhou², Lintao Chen³, Juan Xu⁴, Yi Shang⁵

¹School of Science, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

²No. 5 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Qinhuangdao Hebei

文章引用: 崔林, 蔺斌, 周张峰, 陈琳涛, 徐娟, 尚义. 面向寒冷地区的预溶胀 SBS 改性沥青的制备及其改性效果[J]. 土木工程, 2026, 15(7): 159-172. DOI: 10.12677/hjce.2026.157188

³Tianjin Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Tianjin⁴Xi'an Changda Highway Engineering Testing Center Co., Ltd., Xi'an Shaanxi⁵School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

Received: June 29, 2026; accepted: July 21, 2026; published: July 31, 2026

Abstract

In order to meet the requirements of low-temperature performance, aging performance and storage stability of asphalt materials in cold regions, a pre-swelling styrene-butadiene-styrene (SBS) modifier technology was proposed. In this paper, the pre-swelling SBS particles of aromatic oil were used to form a pre-swelling SBS modifier (PS-SBS) with uniform flow dynamics. It is mixed with matrix asphalt by simple mechanical mixing process to prepare modified asphalt with excellent performance. The effects of PS-SBS preparation methods and different processing parameters on the properties of modified asphalt were studied. PS-SBS and traditional SBS modified asphalt were compared and studied, and the aging characteristics and low-temperature rheological properties of PS-SBS modified asphalt were systematically analyzed. The results showed that the mass ratio of aromatic oil:SBS was 0.8:1, and PS-SBS reached the best swelling state at 80°C for 60 h. The optimal preparation process of PS-SBS modified asphalt was 140°C, stirring for 1.0 h at 1000 r/min, and then maintaining 140°C for 1.0 h. PS-SBS modified asphalt has lower viscosity, better storage stability, and better low-temperature performance and aging performance, but its high-temperature performance is affected to a certain extent. FM and FTIR analysis showed that the pre-swelling process improved the asphalt compatibility by improving the swelling and dispersion states of SBS, and the modification mechanism was mainly physical blending. This study provides a theoretical basis and technical support for the preparation and performance optimization of SBS modified asphalt in cold regions.

Keywords

Pre-Swelling SBS Modifier, Pre-Swelling SBS Modified Asphalt, Modified Asphalt Preparation Process, Cold Regions, Asphalt Performance

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

在寒冷地区严酷的气候与交通荷载作用下,路面沥青材料需同时具备优异的低温抗裂性与长期耐久性,这对改性沥青的性能提出了更高要求。SBS 改性沥青虽然能显著改善沥青的高低温性能,但其在寒冷地区的应用中仍面临低温韧性不足、长期性能衰减较快等问题。首先, SBS 改性的传统工艺需在高温(约 170°C~180°C)与高剪切速率(4000~8000 r/min)下剪切发育而成,不仅能耗高,不符合绿色低碳发展要求,还会加剧沥青热氧老化,影响路面的路用性能与服役寿命[1]-[3];同时, SBS 与沥青相容性差,由于两者结构差异显著, SBS 属于高分子聚合物,易在储存和运输过程中发生相分离[4]-[7]。从沥青 SARA 组分与胶体结构角度分析, SBS 的加入会吸收部分轻质组分,自身作为“新增沥青质”分散于体系中,从而提升沥青的工程性能。然而,原有沥青胶体难以充分稳定新增的 SBS 胶粒与沥青质,加之 SBS 本身与沥青相容性不佳,导致改性沥青储存稳定性下降,长期静置后出现相分离,影响实际应用[8]-[10]。为提

升改性沥青的相容性与储存稳定性，研究人员多采用添加相容剂的方法，如生物油、环烷油、橡胶油和蜡渣等轻质油分，这些方法虽有一定效果，但都是在沥青改性的同时加入，仍存在工艺复杂、溶胀效果或环保性等局限[11]-[14]。

基于芳烃油在常温下对 SBS 的良好溶胀效果，本文提出一种面向寒冷地区特征的新型预溶胀 SBS 改性沥青(PS-SBS 改性沥青)技术。该技术是在 80℃的条件下，采用芳烃油对 SBS 颗粒(或粉)进行预溶胀，使其分子链解缠并转为流动态，从而可在较低温度(≤140℃)和剪切速率(≤1200 r/min)下实现 SBS 在沥青中的均匀分散。芳烃油的引入不仅改善了 SBS 与沥青的相容性，还能同步提升其储存稳定性与低温性能，改善高温加热与储存工艺带来的沥青热氧老化现象。系统研究了 PS-SBS 改性剂的制备工艺、改性效果与微观改性机理，为提升寒冷地区 SBS 改性沥青的性能、改善加工工艺提供新的方法与理论依据。

2. 预溶胀 SBS (PS-SBS)改性剂的制备

2.1. 原材料

基质沥青选用山东京博石油化工有限公司生产的 A-90 基质沥青进行改性，具体指标如表 1 所示。

Table 1. Matrix asphalt testing indicators
表 1. 基质沥青测试指标

指标		质量指标	实测	试验方法
针入度(25℃, 5 s, 100 g)/0.1 mm		80~100	89	T 0604-2011
软化点/℃		不小于 45	45.5	T 0606-2011
延度	10℃延度/cm	不小于 45	48	T 0605-2011
	15℃延度/cm	不小于 100	>100	
60℃动力粘度/(Pa·s)		不小于 160	170	T 0620-2011
RTFOT 后	质量损失/%	不大于±0.8	0.42	T 0609-2011
	针入度比/%	不小于 57	65.2	T 0604-2011
	10℃残留延度/cm	不小于 8	13	T 0605-2011

轻质油选用山东齐鲁石化公司生产的 S1000#芳烃油，具体指标如表 2 所示。

Table 2. Light oil testing indicators
表 2. 轻质油测试指标

项目		质量指标	实测	试验方法
馏程/℃	初馏点	不小于 149	152.5	GB/T 6536
	终馏点	不大于 180	175.5	
闪点/℃		不小于 38	42.5	GB/T 261
密度/20℃, kg/m ³		0.861~0.878	0.872	GB/T 1884
芳烃含量/%		大于 95	99.68	GB/T 11132
硫含量/%		小于 0.01	0.002	SH/T 0689

本文选用石油化工公司生产的 YH-792 型线型分子结构的 SBS 颗粒，SBS 颗粒具体指标如表 3 所示。

Table 3. SBS pellet test indicators
表 3. SBS 颗粒测试指标

拉伸强度/MPa	S/B 比	熔体流动速率/(g/10 min)	挥发份/%
23.1	40/60	3.23	0.2

2.2. PS-SBS 改性剂的制备

PS-SBS 制备工艺的核心在于使芳烃油充分渗入 SBS 颗粒，并在较温和条件下使 SBS 颗粒达到溶胀平衡，转变为流态。具体制备步骤如下：

- 1) 在实验室经反复试验后确定出溶剂(芳烃油):SBS 质量比 wt 为 0.8:1。按照比例称取芳烃油和 SBS 颗粒，将 SBS 颗粒按压至芳烃油中，使其完全浸入其中，并密封于容器中。
- 2) 将混合物置于 80℃ 的保温箱中，使其均匀溶胀，随后边用搅拌棒搅拌边溶胀，随着溶胀的进行，逐渐形成均匀、半透明的 PS-SBS 改性剂。

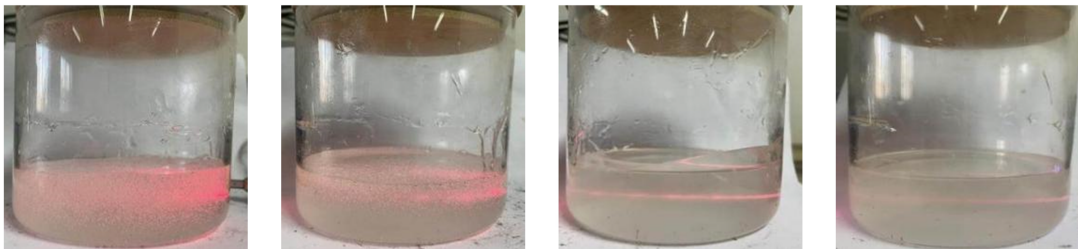
2.3. 丁达尔效应法检验 SBS 的溶胀效果

达尔效应是指当一束光通过胶体体系时，由于胶体粒子尺寸介于 1~100 nm 之间，能够对入射光发生散射，在侧向出现可见光路的现象。图 1(a)~(d)展示了芳烃油-SBS 混合物在 80℃ 条件下保温不同时长所对应的丁达尔效应现象。

其中，保温溶胀 24 h 的图 1(a)和 48 h 图 1(b)中的透射光路不清晰，丁达尔现象较弱，说明此时 SBS 颗粒尺寸仍然较大，芳烃油对 SBS 的溶胀不充分，体系尚未形成稳定的胶体结构。随着保温时间的延长，60 h 的图 1(c)中可以观察到清晰连续的透射光路，表明该体系产生了显著的丁达尔效应，此时，SBS 已充分溶胀并形成胶体体系，其胶束粒径达到 1~100 nm 范围[15]。

当溶胀时间进一步延长至 72 h 时，体系仍表现出良好的丁达尔现象，表明胶体结构保持稳定。需要指出的是，在 SBS 溶胀初期，由于体系中可能生成微小气泡，会对光路的均匀性产生一定干扰；但随着溶胀过程的推进，气泡数量逐渐减少并最终消失，对丁达尔现象的影响显著减弱。

经过反复测试验证，芳烃油:SBS 的质量比为 0.8:1，80℃ 溶胀 60 h 即可达到最佳溶胀状态。



(a) 0.8:1—加入24 h (b) 0.8:1—加入48 h (c) 0.8:1—加入60 h (d) 0.8:1—加入72 h

Figure 1. Tyndall effect at different developmental times
图 1. 不同发育时间的丁达尔效应

3. PS-SBS 改性沥青的制备工艺与影响因素分析

3.1. PS-SBS 改性沥青的制备

本文采用低温搅拌改性工艺来制备 PS-SBS 改性沥青。改性过程中，将 PS-SBS 改性剂加入基质沥青

中，搅拌温度控制在略高于芳烃油沸点的 140℃，以降低芳烃油的挥发损失，并保证其在沥青中的充分溶胀与均匀分散。为系统研究改性工艺参数对改性效果的影响，选取搅拌转速、搅拌时间、发育温度及发育时间 4 个因素作为变量，通过分析改性沥青的相关技术指标，确定合理的加工工艺参数。

表 4 给出了 PS-SBS 改性沥青制作工艺的试验参数，并与传统 SBS 改性沥青制备工艺进行了对比分析，相比高温(170℃~180℃)与强剪切的制备工艺，PS-SBS 改性沥青在能源消耗以及对沥青的热老化方面优势显著。预溶胀改性法期望通过降低加工温度来减缓改性沥青的老化，同时轻质溶剂的加入可提高改性沥青的低温性能，对低温寒冷地区改性沥青的加工和性能提升会带来更多的便利和优势。

Table 4. Comparison of PS-SBS modified asphalt with traditional SBS modified asphalt preparation process
表 4. PS-SBS 改性沥青与传统 SBS 改性沥青制备工艺对比

工艺对比分析	PS-SBS 改性沥青	传统 SBS 改性沥青
工艺特点	加入 PS-SBS 改性剂低温搅拌再次发育	高温基质沥青中加入 SBS 高速剪切发育
搅拌温度	140℃	170℃~180℃
发育温度	设计 130℃、140℃、150℃ 3 种	150℃~170℃
发育时间	设计 0.5 h、1 h、1.5 h、2 h 3 种	1 h
搅拌/剪切方式	设计转速为 800、1000、1200 r/min 搅拌 3 种	4000~8000 r/min

图 2 给出了 PS-SBS 改性沥青制备搅拌中以及发育前后的典型的图片。

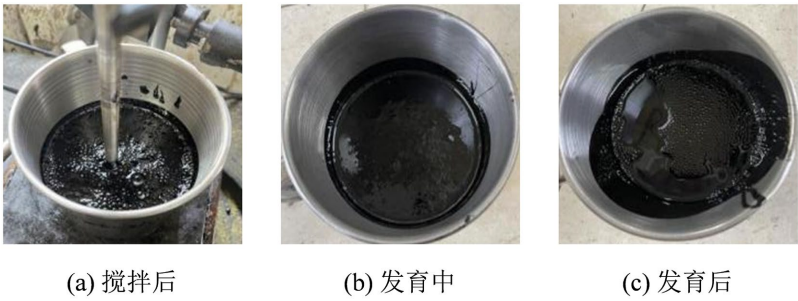


Figure 2. Preparation process of PS-SBS modified asphalt
图 2. PS-SBS 改性沥青制备过程

从图 2 可以观察到，PS-SBS 改性沥青搅拌后内部会产生大量气泡，发育过程中表面及内部仍存在气泡和 SBS 的细小颗粒，这主要是由于芳烃油加热挥发带来的由内到外的气泡，同时也表明 SBS 需要再次溶胀与发育。随着发育时间的延长，SBS 颗粒逐渐减少并消失，发育完成后，气泡和小颗粒都已消失，改性体系趋于均匀稳定，说明此时改性沥青已形成稳定的胶体结构。

3.2. 影响因素分析

为系统分析 PS-SBS 改性沥青的制备条件对其性能的影响，本文选取软化点、针入度、低温延度及 25℃弹性恢复为评价指标[16]，讨论搅拌速率、搅拌、发育时间和发育温度的作用规律，并结合表 5 及图 3、图 4 进行综合分析。

首先在搅拌温度固定为 140℃条件下，研究不同搅拌速率对改性沥青性能的影响，试验结果如表 5 所示。

Table 5. Test results of modified asphalt at different mixing rates
表 5. 不同搅拌速率下改性沥青的测试效果

搅拌速率/r/min	800	1000	1200
软化点/℃	58.6	62.9	61.4
25℃针入度/0.1 mm	44.5	44.1	45.2
5℃延度/cm	24.3	29.3	27.6
弹性恢复/%	80.4	85.9	83.2

由表 5 可知,搅拌速率对改性沥青性能影响显著。当搅拌速率过低时,PS-SBS 在沥青中分散不充分,容易出现结团现象,导致其低温延度和弹性恢复偏低,这会造成寒冷地区路面抗低温开裂性能下降;搅拌速率过高则会加剧轻质组分挥发,并可能破坏 SBS 形成的网络结构,从而不利于提高 PS-SBS 改性沥青的低温性能。综合各项性能指标,确定 1000 r/min 为兼顾低温性能与整体路用性能的较优搅拌速率。

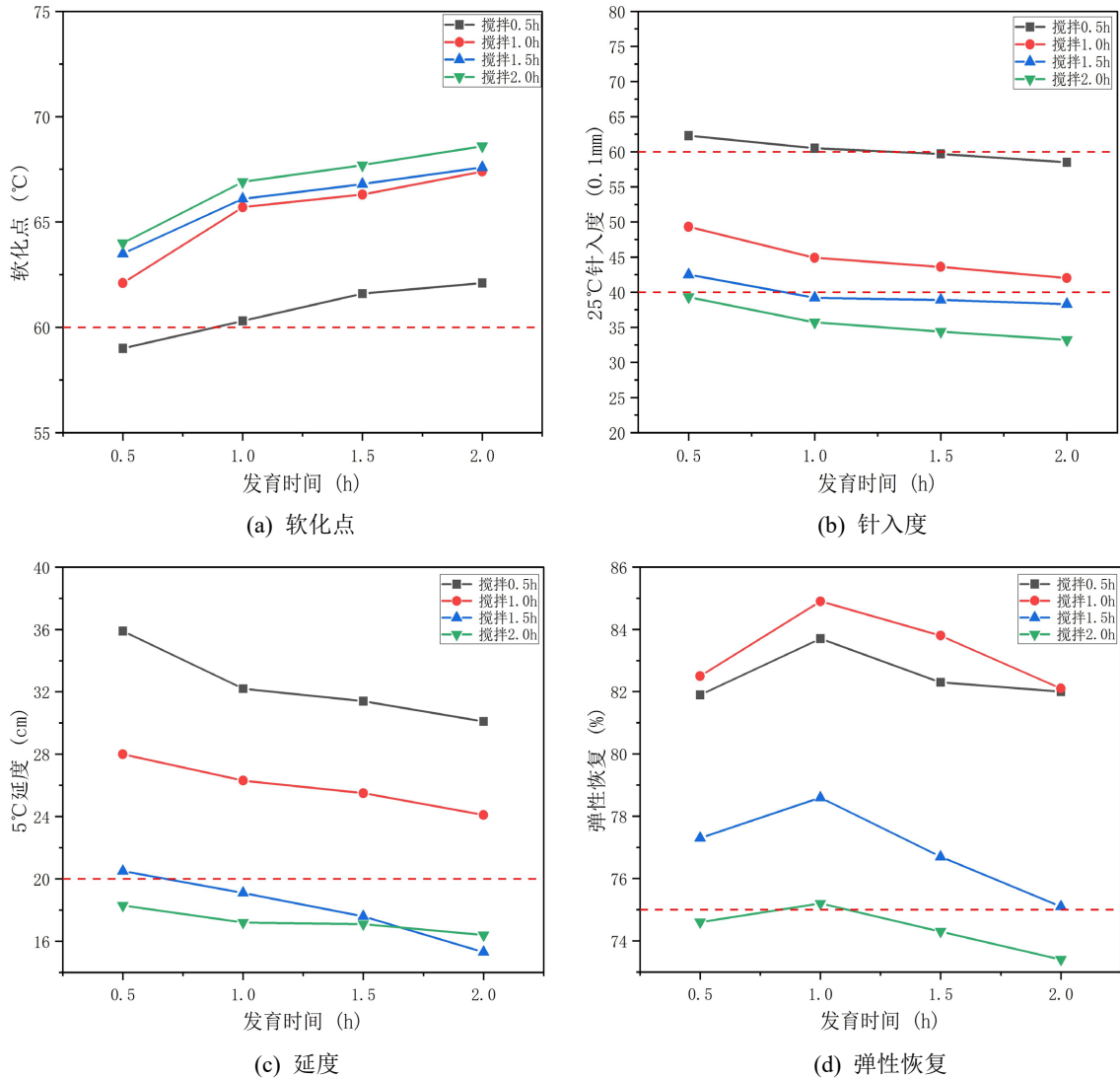


Figure 3. Changes of modified asphalt properties with mixing-development time
图 3. 改性沥青性能随搅拌 - 发育时间的变化

接着选取搅拌温度 140℃、搅拌速率 1000 r/min, 进一步分析不同搅拌时间和发育时间对改性沥青性能的影响, 结果见图 3。

由图 3 可知, 搅拌时间过短(0.5 h)会导致改性剂分散不足, 改性沥青的软化点和针入度难以达标, 同时低温延度偏低; 若搅拌时间控制在 1.5 h, 部分发育时间条件下低温性能仍难以稳定满足寒冷地区的使用要求; 搅拌时间过长(2.0 h)虽能提高软化点, 但针入度和延度明显下降, 导致沥青过硬, 这可能与轻质组分挥发及热氧老化有关。相比之下, 搅拌时间为 1.0 h 时, 不同发育时间对性能影响较小, 整体性能较为均衡。综合来看, 确定搅拌时间和发育时间均为 1.0 h。

最后, 采用前述优化参数制备 PS-SBS 改性沥青, 考察不同发育温度对其性能的影响, 测试结果如图 4 所示。

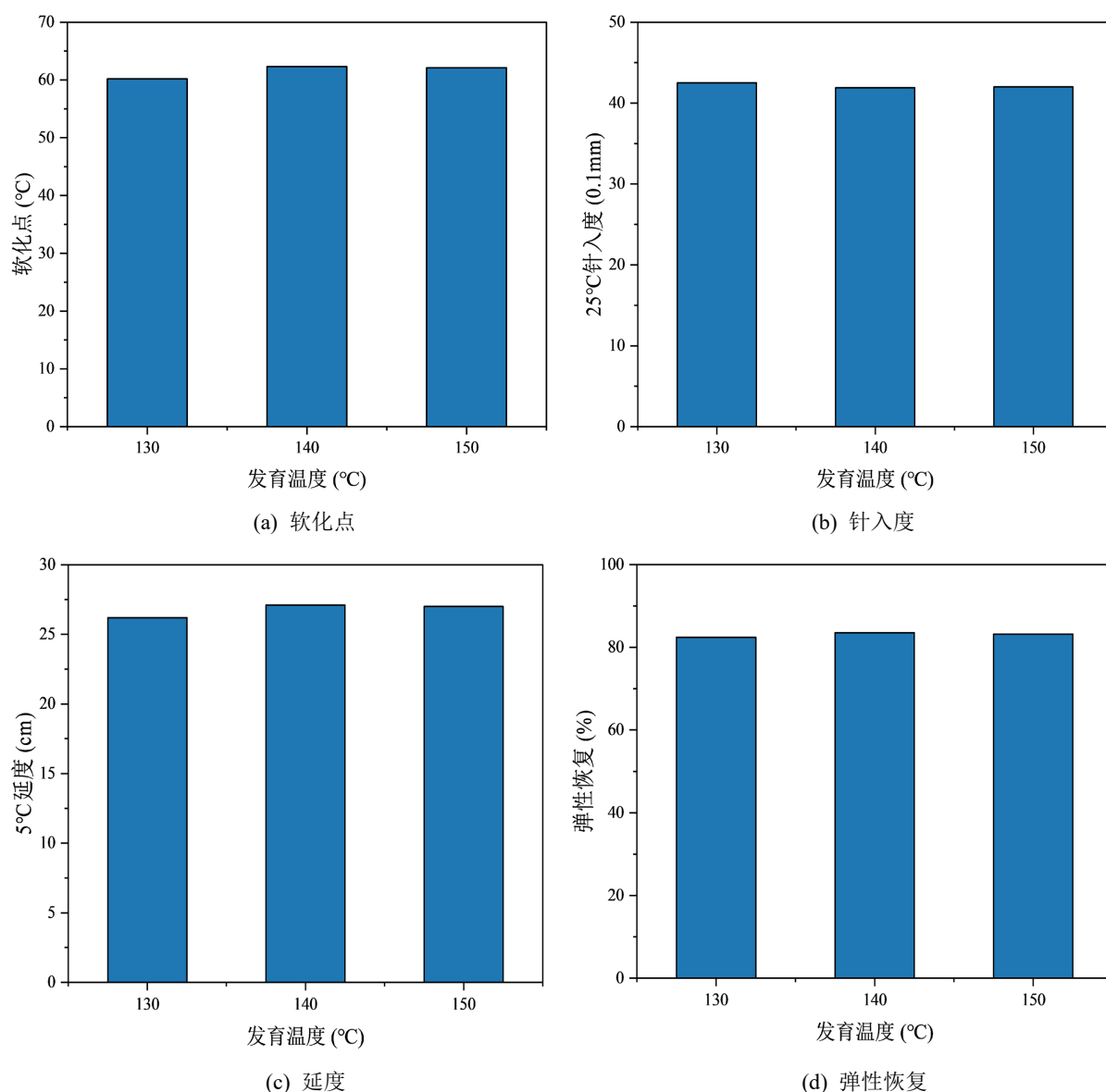


Figure 4. Changes of modified asphalt test indexes with development temperature

图 4. 改性沥青测试指标随发育温度的变化

由图 4 可知, 改性沥青的三大指标及弹性恢复在研究区间内变化平缓, 无显著波动, 表明发育温度对其整体路用性能, 尤其是寒冷地区关注的低温延展性和弹性恢复能力影响相对有限。因此, 发育温度在 130℃~150℃ 范围内均可适用; 综合考虑性能表现与能耗, 推荐 140℃ 为寒冷地区 PS-SBS 改性沥青制备的最佳发育温度。

综合搅拌时间、速率、温度及发育时间的研究, 重点结合寒冷地区对低温延展性的使用需求, 最终确定 PS-SBS 改性沥青的最佳制备条件为: 基质沥青加热温度 140℃, 搅拌温度 140℃, 搅拌速率 1000 r/min, 发育温度 140℃, 搅拌时间 1.0 h。

4. PS-SBS 改性沥青性能分析

4.1. PS-SBS 改性沥青与传统 SBS 改性沥青性能对比分析

采用上述试验确定的 PS-SBS 改性沥青工艺参数, 针对 25℃ 针入度、软化点、5℃ 延度、135℃ 旋转粘度, 在相同的有效 SBS 掺量(3%~5%)下, 与传统工艺所制备出的改性沥青进行对比分析, 结果分析如下。

4.1.1. 三大指标对比

三大指标试验结果如图 5 所示。

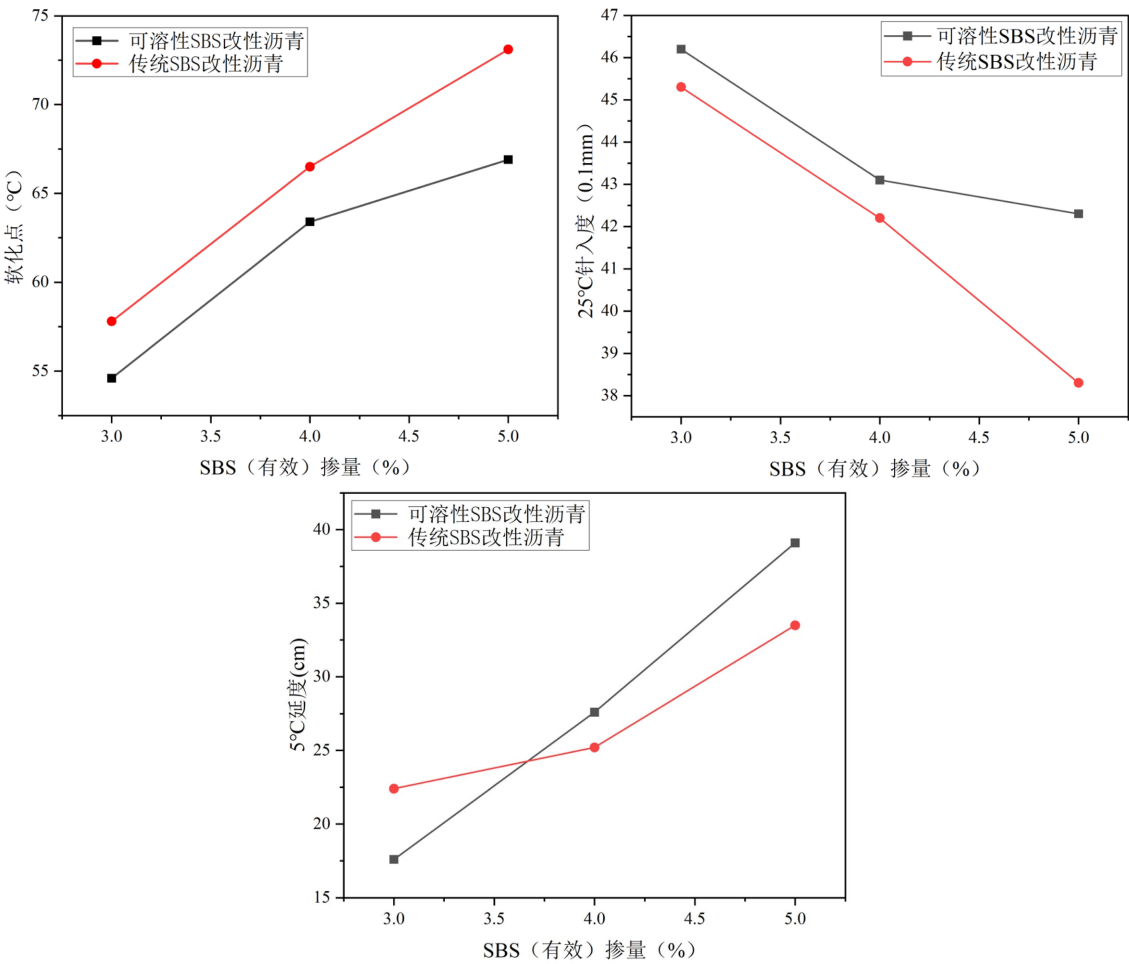


Figure 5. Test results of three major indicators of two types of modified asphalt
图 5. 两种改性沥青三大指标试验结果

由图 5 可知, 两种 SBS 改性沥青性能变化规律基本相同, 说明 PS-SBS 中的 SBS 微粒可以对沥青起到比较好的改性作用。相比传统的改性沥青, PS-SBS 表现为软化点降低(但仍高于 60°C), 低温延度提高, 针入度变大, 表明 PS-SBS 改性剂更有利于改善沥青的低温延展性, 更适合于寒冷地区。

4.1.2. 135°C 布氏旋转黏度分析

为进一步评价改性沥青的施工流变特性, 测试了两种改性沥青的 135°C 布氏旋转黏度, 试验结果如图 6 所示。

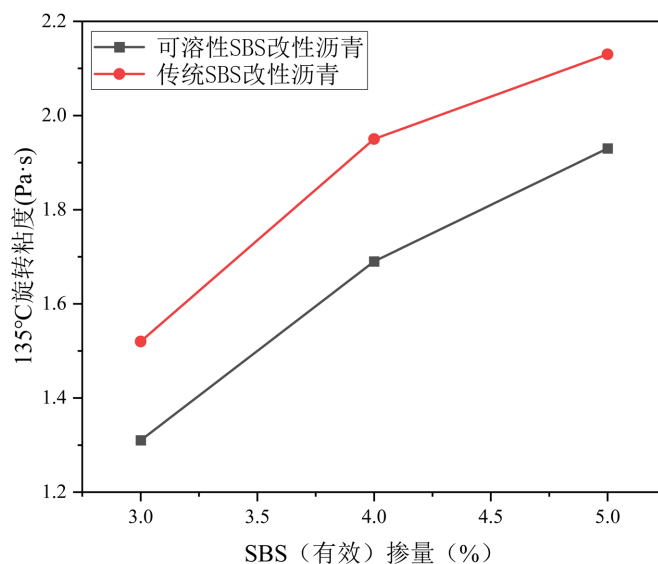


Figure 6. Viscosity test results of two types of modified asphalt
图 6. 两种改性沥青粘度试验结果

图 6 表明, 随着 SBS 掺量增加, 两种改性沥青在 135°C 下的旋转黏度均逐渐增大。相比传统 SBS 改性沥青, PS-SBS 黏度略低, 这说明其中芳烃油对沥青具有稀释和软化作用, 使针入度和延度提高, 而软化点和黏度降低。当 SBS 掺量为 4.0% 时, 旋转黏度为 $1.7 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 比传统的值 $1.8 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 小, 具有很好的施工性能[17]。

4.2. PS-SBS 改性沥青老化性能分析

SBS 类改性沥青老化是一个复杂的过程, 包括基质沥青的硬化和 SBS 的降解, 两者相互作用使得沥青的化学结构发生了变化, 从而造成了沥青老化[18]。本文分别对 PS-SBS 和传统 SBS 改性沥青进行短期和长期老化模拟试验, 对可能使改性沥青老化性能发生变化的因素进行系统研究。

采用旋转薄膜烘箱老化试验(RTFOT)模拟沥青短期老化, 按 JTG E20-2011 规程进行[19], 并以老化前后软化点、 25°C 针入度、和 5°C 延度评价其短期老化性能; 接着, 对经 RTFOT 老化的两种改性沥青进行 PAV 压力老化试验模拟长期老化, 试验条件为 100°C 、20 h, 采用相同指标评价其长期老化性能。PS-SBS 和传统 SBS 改性沥青的 RTFOT 和 PAV 试验结果如表 6 所示。(试验前后的变化值表示方法: 测试值增大用 “+” 表示、降低用 “-” 表示。)

由表 6 可知, PS-SBS 改性沥青软化点在 RTFOT 和 PAV 老化后分别提高 2.1°C 和 6.4°C , 低于传统 SBS 改性沥青的 2.7°C 和 8.4°C ; 而且 25°C 针入度分别下降 8.7 和 13.5 (0.1 mm), 其下降幅度仍然小于传统 SBS 改性沥青。这说明 PS-SBS 改性沥青在短期与长期老化作用下的硬化程度较轻, 抗老化能力优于

传统 SBS 改性沥青。同时, PS-SBS 改性沥青 5℃延度降幅为 10.8 cm 和 16.3 cm, 同样低于传统 SBS 改性沥青的 10.9 cm 和 18.4 cm, 这表明在老化后 PS-SBS 改性沥青低温性能保持能力更优。

Table 6. Comparison of indicators before and after the RTFOT and PAV tests of the two types of asphalt
表 6. 两种沥青 RTFOT、PAV 试验前后指标对比

测试条件		原样	RTFOT 后	RTFOT 前后变化值	PAV 后	PAV 前后变化值
沥青测试指标						
PS-SBS 改性沥青	软化点/℃	63.4	65.5	+2.1	69.8	+6.4
	25℃针入度/0.1 mm	44.5	35.8	-8.7	31.0	-13.5
	5℃延度/cm	27.6	16.8	-10.8	11.3	-16.3
传统 SBS 改性沥青	软化点/℃	67.5	70.2	+2.7	75.9	+8.4
	25℃针入度/0.1 mm	42.2	32.2	-10.0	26.9	-15.3
	5℃延度/cm	26.2	15.3	-10.9	7.8	-18.4

整体来看, 老化程度由短期向长期逐步加深, 沥青高温稳定性提高, 但低温抗裂性能明显削弱。与传统 SBS 改性沥青相比, PS-SBS 改性沥青在寒冷地区表现出更好的环境适应性和工程适用性, 具有更为广泛的寒冷地区应用前景。

4.3. PS-SBS 改性沥青低温流变性能分析

传统方法难以全面评价改性沥青低温抗裂性能。相比之下, 低温弯曲梁流变试验(Bending Beam Rheometer Test, 以下简称为 BBR)通过蠕变劲度模量(S)和蠕变速率(m), 从而提供了科学的低温抗裂性能评价方法。S 值反映沥青的抗变形能力, 值越大, 材料的蠕变变形越小, 抗裂能力越差; m 值则表示应力松弛能力, 值越高, 沥青释放应力的能力越强, 有助于抑制裂缝发展。

为对比 PS-SBS 与传统 SBS 改性沥青的低温性能, 在 PAV 老化试验后, 分别在-12℃、-18℃和-24℃下进行 BBR 试验, 并与基质沥青进行了比较。试验结果如表 7 所示。

Table 7. BBR test results of different types of asphalt
表 7. 不同类型沥青 BBR 试验结果

沥青类型	-12℃		-18℃		-24℃	
	蠕变劲度模量 S/MPa	蠕变速率 m	蠕变劲度模量 S/MPa	蠕变速率 m	蠕变劲度模量 S/MPa	蠕变速率 m
基质沥青	168	0.262	369	0.225	651	0.191
PS-SBS 改性沥青	98	0.402	192	0.312	338	0.266
传统 SBS 改性沥青	104	0.380	221	0.285	379	0.234

由表 7 可得, 随着温度由-12℃降至-24℃, 三种沥青的蠕变劲度模量 S 均显著增大、蠕变速率 m 持续减小, 低温变形能力逐渐减弱。其中, 基质沥青 S 值由 168 MPa 增至 651 MPa, m 值由 0.262 降至 0.191, 其低温性能最差。相比之下, PS-SBS 改性沥青在各温度下均表现出最低的 S 值和最高的 m 值, 其 S 值分别为 98、192 和 338 MPa, m 值分别为 0.402、0.312 和 0.266, 优于传统 SBS 改性沥青对应的 104、221、379 MPa 和 0.380、0.285、0.234。结果表明, PS-SBS 改性沥青在不同低温条件下具有更优的应力松弛能力和低温抗裂性能。

5. PS-SBS 改性沥青微观结构机理研究

从微观结构角度出发,采用荧光显微镜(FM)和傅里叶红外光谱(FTIR)等手段,对 PS-SBS 及传统 SBS 改性沥青的微观形态特征与改性机理进行系统分析。通过对比两种改性方式下 SBS 在沥青中的分散状态及官能团变化规律,揭示预溶胀工艺对改性沥青相容性、结构特征及性能差异的内在作用机制,为宏观性能分析提供微观依据。

5.1. 荧光显微镜试验(FM)

荧光显微镜(FM)是检测沥青-聚合物共混物形态和相容性最常用的方法,由于 SBS 改性剂的荧光效应, SBS 类改性沥青可以用紫外光照射激发,然后在光学显微镜下观察到聚合物相发射出的荧光[20]。利用荧光显微镜观察改性沥青的形态,不仅可以确定 SBS 在基质沥青中的分散状态,还可以表征改性沥青的连续相和不连续相。

采用以下方法制备用于形貌分析的改性沥青样品:加热改性沥青后,将一滴样品滴在玻片中心,之后用盖玻片对液滴进行覆盖。为了使样品表面光滑,便于观察,将被覆盖的样品在烘箱中加热至 135℃,约 10 min 后在玻片上形成半透明膜,之后冷却至室温,在室温下将样品置于放大倍数为 400 倍的显微镜下观察。

为方便分析,将制备好的三种类型改性沥青(4%与 5%掺量预溶胀 SBS 改性沥青、传统 SBS 改性沥青)的试验样品立即进行试验。为方便表示,将这三种类型改性沥青分别命名为样品 a、样品 b、样品 c,结果见图 7。

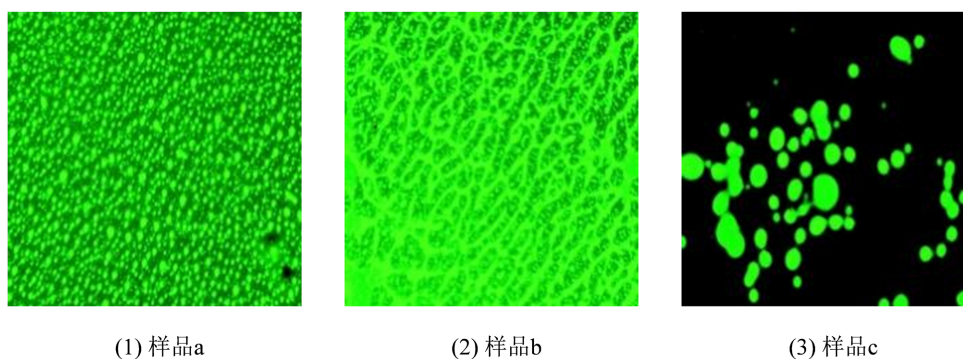


Figure 7. Test results of three types of modified asphalt FM

图 7. 三种类型改性沥青 FM 试验结果

图 7 中产生荧光效应的部分即为 SBS 改性剂。

对比三种改性沥青可知, SBS 掺量由 4%增至 5%时,改性剂颗粒逐渐连结形成网络结构;样品 a 中 PS-SBS 改性沥青在轻质油作用下以细小颗粒均匀分散;传统 SBS 改性沥青的 SBS 颗粒较大,溶胀网络效果并不及两种 PS-SBS 改性沥青。也正是 PS-SBS 改性沥青中的轻质油的溶胀与分散效果对沥青产生软化作用,致其高温性能弱于样品 c,这也是传统 SBS 改性沥青在高温性能方面表现更优的原因。

5.2. 傅里叶红外光谱(FTIR)试验

傅里叶红外光谱(FTIR)可有效表征沥青老化过程中官能团的变化。为分析 PS-SBS、传统 SBS 改性沥青和基质沥青老化前后的官能团特征,采用 KBr 压片法对上述三类沥青老化前后的 FTIR 光谱进行定量分析。

采用 WQF-510A 型 FTIR 红外光谱仪(见图 8)进行试验。样品制备时, 将少量沥青置于离心管中, 加入三氯乙烯震荡并静置 1 h 使其充分溶解, 随后将溶液滴加至完成空白扫描的 KBr 压片上形成液膜, 经热灯干燥 1 min 得到半透明沥青膜。测试波数范围为 $500\sim 4000\text{ cm}^{-1}$, 分辨率 4 cm^{-1} , 每个样品扫描 32 次。

将基质沥青、传统 SBS 改性沥青的红外光谱与 PS-SBS 改性沥青进行对比, 从而探究其改性机理。用 Origin 软件对试验结果进行寻峰后, 绘制成图 8。

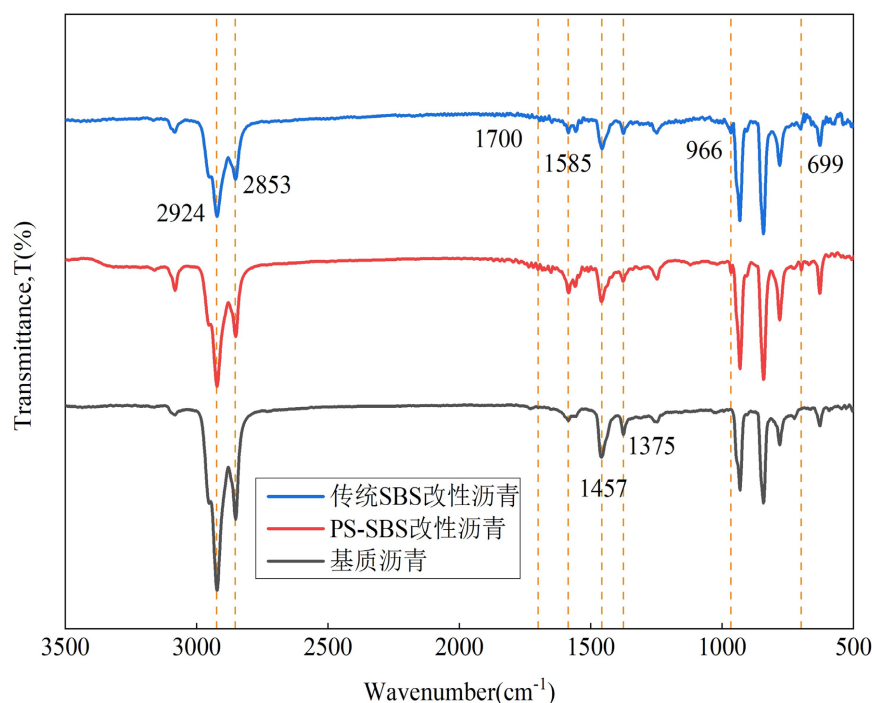


Figure 8. Infrared spectra of three types of asphalt Fourier transform

图 8. 三种类型沥青傅里叶红外光谱图

FTIR 结果表明, 基质沥青在 2853 和 2924 cm^{-1} 处出现饱和烃($-\text{CH}_2-$, $-\text{CH}_3-$)的 C-H 伸缩振动强吸收峰。经 SBS 改性后, 吸收峰强度有所降低, 主要由于 SBS 分子由苯乙烯段和丁二烯段构成, 其饱和 C-H 键比例低于基质沥青, 且芳香环 C-H 振动特性不同。

1585 cm^{-1} 吸收峰归因于沥青芳香烃及 SBS 苯乙烯段芳香环骨架 $\text{C}=\text{C}$ 伸缩振动, 1700 cm^{-1} 附近峰形变化与改性过程中高温氧化生成的羰基结构有关。 1457 和 1375 cm^{-1} 分别对应 $-\text{CH}_2-$ 和 $-\text{CH}_3-$ 的剪切振动。指纹区中, 966 cm^{-1} 和 699 cm^{-1} 分别为丁二烯段反式 1,4 结构及苯乙烯段单取代苯环的特征吸收峰。

三种沥青主要吸收峰位置基本一致, PS-SBS 与传统 SBS 改性沥青光谱差异不显著, 表明其改性机理以物理共混为主, 未形成新化学结构。

6. 结论

1) 芳烃油预溶胀可改善 SBS 的分散状态。本研究确定较适宜的预溶胀条件为芳烃油与 SBS 质量比 $0.8:1$ 、 80°C 预溶胀 60 h。丁达尔效应及粒径结果表明, 体系呈胶体特征, SBS 胶束粒径主要分布在 $1\sim 100\text{ nm}$ 。结合常规性能指标, 确定 PS-SBS 改性沥青的适宜制备工艺为 140°C 、 1000 r/min 搅拌 1.0 h, 并发育 1.0 h。

2) 常规性能试验表明, PS-SBS 改性沥青在老化后低温性能保持方面优于传统 SBS 改性沥青。PAV 老化后, 其 5℃ 延度仍保持较高水平, 说明预溶胀工艺有助于提升改性沥青的低温延展性和抗裂能力。但芳烃油的引入可能削弱材料的高温稳定性, 应关注其潜在车辙风险。

3) BBR 试验表明, 在-18℃和-24℃下, PS-SBS 改性沥青的蠕变劲度模量 S 低于传统 SBS 改性沥青, 蠕变速率 m 相对较高, 说明其低温柔顺性和应力松弛能力更好, 进一步验证了其低温抗裂性能优势。

4) FM 与 FTIR 结果表明, 预溶胀工艺可以有效改善 SBS 的溶胀与分散状态, 促进网络结构形成, 提高改性沥青的相容性并影响其宏观性能。PS-SBS 与传统 SBS 改性沥青均以物理共混为主, 未产生新的化学结构。

参考文献

- [1] 贾晓凡, 曹贵, 张喜军, 等. 稳定剂掺量对胶粉/SBS 复合改性沥青性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2022, 40(3): 484-90+546.
- [2] 陈向东, 邹佳慧, 李恩泽, 孔德智. SBS 相对分子质量对改性沥青性能影响分析[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(28): 12342-9.
- [3] Xiao, H., Cao, D., Qin, Z., Yi, H. and Chen, X. (2023) Research on the Effects of SBS Swelling, Thermal-Oxidative Aging, and Sulfur Crosslinking on Chemical Composition and Rheological Properties of SBS-Modified Asphalt. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **18**, 930-950. <https://doi.org/10.1007/s42947-023-00390-z>
- [4] Zhang, X., Guo, F., Li, B., Liu, W., Zhang, K. and Liu, Z. (2024) Comprehensive Analysis of Compatibility and Low-Temperature Rheological Properties of SBS Modified Asphalt Binder Using Entropy Weight-TOPSIS Method. *Construction and Building Materials*, **457**, Article ID: 139364. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139364>
- [5] 秦成林, 董夫强, 李洋, 等. SBS 改性沥青在循环加热储存过程的性能衰减和提升研究[J]. 公路工程, 2022, 47(1): 115-22.
- [6] 邢明亮, 张心攀, 赵曦, 等. 高黏改性沥青研究进展[J]. 应用化工, 2023, 52(5): 1530-1536.
- [7] 李克南, 延西利, 王钰洁, 等. 温拌 SBS 改性沥青的流变特性及微观机理研究[J]. 应用化工, 2023, 52(12): 3309-13+20.
- [8] Zhao, Y., Gong, X. and Liu, Q. (2023) Research on Rheological Properties and Modification Mechanism of Waterborne Polyurethane Modified Bitumen. *Construction and Building Materials*, **371**, Article ID: 130775. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130775>
- [9] 李纯, 钱军, 黄宏海, 等. 不同微观结构脱硫胶粉的制备及其对改性沥青性能影响[J]. 高分子通报, 2023, 36(2): 213-223.
- [10] 陈成勇, 马士杰, 朱世超, 等. SBS 改性沥青储存稳定性检测方法对比分析[J]. 公路工程, 2023, 48(6): 173-178.
- [11] 王诗雨, 董夫强, 于新, 等. 相容剂组成对 SBS 改性沥青抗老化性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(9): 996-1002.
- [12] 张红兵, 张海峰, 崔振文. 外加剂的引入对 SBS-橡胶粉复合改性沥青性能影响研究[J]. 公路, 2021, 66(2): 286-290.
- [13] Nie, X., Li, Z., Yao, H., Hou, T., Zhou, X. and Li, C. (2020) Waste Bio-Oil as a Compatibilizer for High Content SBS Modified Asphalt. *Petroleum Science and Technology*, **38**, 316-322. <https://doi.org/10.1080/10916466.2019.1703741>
- [14] Ma, F., Zhu, C., Fu, Z., Li, C., Hou, Y., Jiang, X., et al. (2023) Analysis of Rheological Behavior and Anti-Aging Properties of SBS Modified Asphalt Incorporating UV Absorbent and Naphthenic Oil (NPO). *Construction and Building Materials*, **377**, Article ID: 130958. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130958>
- [15] 李关龙, 王枫, 匡民明, 等. SBS/废胶粉复合改性沥青的性能[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2016, 42(1): 21-27.
- [16] 李伟, 李萍, 张留博, 等. 脲醛树脂微胶囊对 SBS 改性沥青流变特性与自修复效率的影响[J/OL]. 复合材料学报: 1-11. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250722.004>, 2025-11-25.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. JTG F40-2004 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [18] Zhang, D., Zhang, H. and Shi, C. (2017) Investigation of Aging Performance of SBS Modified Asphalt with Various Aging Methods. *Construction and Building Materials*, **145**, 445-451. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.055>

- [19] 中华人民共和国交通运输部. JTG E20-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [20] Martínez-Estrada, A., Chávez-Castellanos, A.E., Herrera-Alonso, M. and Herrera-Nájera, R. (2010) Comparative Study of the Effect of Sulfur on the Morphology and Rheological Properties of SB- and SBS-Modified Asphalt. *Journal of Applied Polymer Science*, **115**, 3409-3422. <https://doi.org/10.1002/app.31407>