

不同低温改性剂对沥青性能的影响及其作用机理研究

周家鹏¹, 房占永², 吴德磊²

(1. 丽水市公路港航与运输管理中心, 浙江 丽水, 323000; 2. 浙江交工集团股份有限公司设计院分公司, 浙江 杭州, 310000)

摘要: 为研究不同类型低温改性剂对沥青性能的影响, 以SBS改性沥青作为母体沥青, 分别选取复合型、烷烃型、聚烯烃型(分别命名为LTM、SAS、XT)3种类型的低温改性剂, 对母体沥青进行改性。通过沥青基本性能试验和流变性能试验, 对3种低温改性沥青进行性能评价; 然后, 结合傅里叶红外光谱试验结果, 分析3种低温改性剂的作用机理。研究结果表明: LTM低温沥青延度提升最大, 达到了97.85 cm, 且其110℃黏度较母体沥青降低了35.9%; SAS低温沥青软化点提升最大, 较母体沥青提升了25.8%, 达到了102.6℃; 低温高频下, LTM低温沥青复数模量达2.5 MPa, 其相位角响应与能量耗散机制趋近纯SBS特征, 表现出均衡的疲劳寿命; FTIR分析表明, LTM与沥青相容性良好, 其720 cm⁻¹与1 460 cm⁻¹处特征峰强度协调, 无改性剂富集。

关键词: 低温改性沥青; 基本性能; 流变性能; 改性机理

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0094-04

Study on Effects of Different Low-Temperature Modifiers on Asphalt Performance and Their Mechanisms of Action

ZHOU Jiapeng¹, FANG Zhanyong², WU Delei²

(1. Lishui City Highway, Port, Waterway and Transportation Management Center, Lishui 323000, China; 2. Design Institute Branch of Zhejiang Communications Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: To study the impact of different low-temperature modifiers on asphalt performance, using SBS modified asphalt as the base asphalt, three types of low-temperature modifiers, namely composite, alkane and polyolefin (designated as LTM, SAS and XT respectively), are selected to modify the base asphalt. The performances of the three low-temperature modified asphalts are evaluated through the basic asphalt performance tests and rheological property tests. Then, combined with the results of Fourier transform infrared spectroscopy experiments, the action mechanisms of the three low-temperature modifiers are analyzed. The research results show that the ductility of LTM low-temperature asphalt improves the most, reaching 97.85 cm, and its viscosity at 110 °C is 35.9% lower than that of the base asphalt. The softening point of SAS low-temperature asphalt increases the most, rising by 25.8% compared to the base asphalt, reaching 102.6 °C. At low temperatures and high frequencies, the complex modulus of LTM low-temperature asphalt reaches 2.5 MPa, and its phase angle response and energy dissipation mechanism approaches the characteristics of pure SBS, exhibiting balanced fatigue life. FTIR analysis indicates that the good compatibility is between LTM and asphalt, with coordinated peak intensities at 720 cm⁻¹ and 1 460 cm⁻¹, indicating no modifier enrichment.

Keywords: low-temperature modified asphalt; basic performance; rheological properties; modification mechanism

0 引言

热拌沥青混合料生产施工温度较高, 存在能耗高、烟气污染大、施工作业环境艰苦、影响作业人员

身体健康等问题^[1-3]。为应对上述挑战, 低温沥青技术逐渐成为行业关注的重要方向。该技术通过在沥青混合料中掺入专用低温改性剂, 能够显著降低拌和与压实温度^[4-5], 从而在保证路用性能的同时, 有效减少能源消耗与环境污染。低温改性剂作为实现低温沥青技术的核心材料, 其种类与性能直接影响着混合料的施工温度、路用性能及长期耐久性^[6-8]。然而, 在工程实践与材料设计中, 如何依据作用机理与改性效果科学地选择或设计改性剂, 仍缺乏系统

收稿日期: 2026-02-01

作者简介: 周家鹏(1974—), 男, 学士, 高级工程师, 从事交通土建工程相关工作。

通信作者: 吴德磊(1994—), 男, 硕士, 工程师, 从事道路养护与科研相关工作。电子邮箱: 798807087@qq.com

的理论指导。针对不同类型低温改性剂,尤其是其与SBS复合改性体系的协同效应和微观机理,尚缺乏充分的系统性对比和机理解析。

本研究选取复合型(LTM)、烷烃型(SAS)及聚烯烃型(XT)3类典型低温改性剂,以SBS改性沥青为母体,制备相应低温改性沥青。通过基本性能与流变性能试验综合评价其宏观性能,并结合傅里叶红外光谱技术,从化学结构层面揭示其作用机理。本研究为低温改性剂的合理选用与功能设计提供了理论与试验依据,对在推进公路沥青路面建养中达到节能减排、绿色养护的养护目标,实现可持续发展,有重要意义。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

试验选用SBS改性沥青作为母体沥青,其技术指标见表1。LTM是一种以高分子树脂、橡胶、交联剂等为主要原料制备而成的低温改性剂;SAS作为Fischer Tropsch (FT)蜡,是一种广泛应用的有机降黏温拌剂;XT是一种改性聚烯烃蜡高分子材料。3种低温改性剂的技术指标见表2至表4,检测标准参考《低温改性沥青》(JT/T 1540—2025)。

表1 母体沥青基本性能指标

试验项目	试验数据	技术要求	试验方法
针入度(25℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	51.6	40~70	T0604
软化点(环球法)/℃	81.55	≥70	T0606
延度(5 cm/min,15℃)/cm	82.23	≥25	T0605

表2 低温改性剂LTM技术指标

指标	技术要求	检测结果	试验方法
密度(20℃)/(g·cm ⁻³)	实测值	0.96	T0603
闪点(开口)/℃	>145	150	T0611
溶解度/%	≥99.5	99.7	T0607
灰分/%	<0.15	0.14	T0614
水分/%	<0.10	0.08	T260

表3 低温改性剂SAS技术指标

项目	结果
密度(25℃)/(g·cm ⁻³)	0.89
黏度(135℃)/(mPa·s)	7.24
pH值(25℃)	5.8
熔点/℃	103
闪点/℃	287

1.2 试验方法与式样制备

1.2.1 试验方法

为评价低温改性剂的性能和改性机理,分别对3

表4 低温改性剂XT技术指标

项目	结果
物理形态 25℃	暗黄色液体
黏度 20℃/(mPa·s)	660~1 225
黏度 30℃/(mPa·s)	350~645
密度 25℃/(kg·m ⁻³)	968
胺值/(mg KOH·g ⁻¹)	515~605
表面张力(0.6 g/L)25℃/(mN·m ⁻¹)	34.0~37.0

种低温沥青进行基本性能试验(三大指标和布氏黏度试验)、动态剪切流变试验(DSR)、傅立叶红外光谱试验(FTIR),试验步骤参考《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG 3410—2025)。

1.2.2 低温改性沥青制备

基于前序研究,确定了3种低温改性剂的最佳掺量分别为4%、3%、3%,将LTM、SAS、XT分别按最佳掺量添加到已称取好的母体沥青中,采用配备控温电热套的搅拌器设备,在150~160℃的温度下以300 r/min的转速进行剪切,剪切时间为30 min。

2 材料性能分析

2.1 基本性能分析

通过针入度、延度、软化点三大指标及布氏旋转黏度试验进行评估。这些指标能够反映沥青在低温条件下的流动性、柔韧性和耐热性等,是评价沥青相关性能的重要依据。具体试验结果如图1至图4所示。

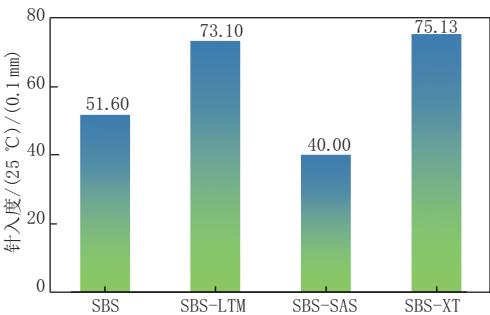


图1 不同类型沥青的针入度试验结果

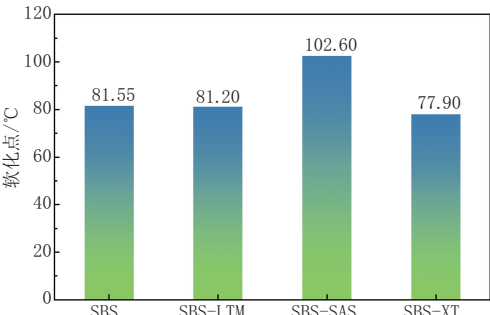


图2 不同类型沥青的软化点试验结果

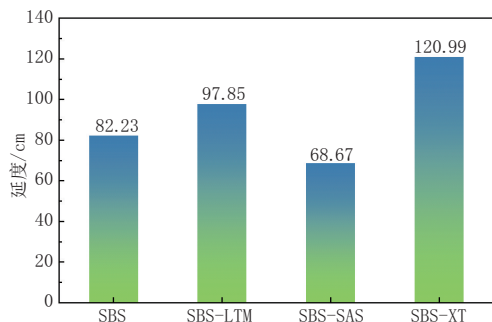


图3 不同类型沥青的延度试验结果图

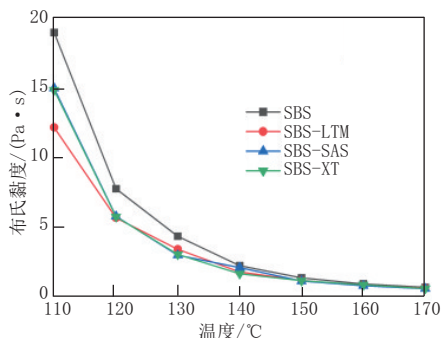


图4 不同类型沥青旋转黏度试验结果

由图1至图4可知,不同添加剂对沥青高温性能的影响具有显著差异。SBS-LTM的软化点为81.20℃,较母体沥青略有降低,说明LTM添加剂在基本维持沥青原有耐热性能的同时,未对其高温稳定性产生明显负面影响;SBS-SAS的软化点显著提高至102.60℃,表明SAS添加剂可大幅提升沥青的高温抗变形能力;SBS-XT的软化点为77.90℃,其对沥青高温性能的改善作用较为有限。3种低温沥青的延度指标分别为97.85 cm、68.67 cm、120.99 cm,即除SBS-SAS外,剩余两种低温沥青的延度较母体沥青均有较大提升。

4种沥青的旋转黏度均随温度升高呈指数级下降,表现出典型的温度敏感性。母体沥青在所有温度下黏度最高,高温流动性较差,但抗变形能力可能最优;SBS-LTM的黏度整体最低,相同温度下比母体沥青降低了30%~40%,尤其在120~130℃区间具有显著的泵送和施工优势;SBS-SAS与SBS-XT性能居中,前者在140℃以上稍优于后者,但差异微弱。综合而言,SBS-LTM最适用于低温拌合或节能施工,而标准SBS更适合要求高温稳定性的重载交通路段,4种沥青在150℃以上黏度均低于1.4 Pa·s,可满足常规施工流动性要求。

2.2 流变性能分析

沥青的流变性能与沥青的内部结构和组成紧密相关,直接反映了沥青在不同温度和不同荷载条件

下的路用性能^[9-10]。3种低温沥青的DSR试验结果如图5至图7所示。

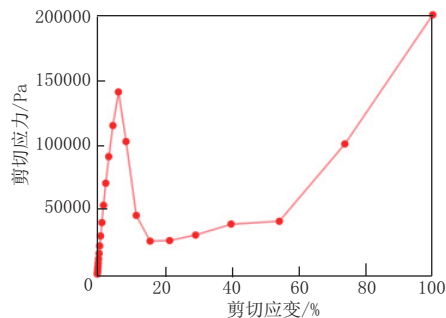


图5 SBS-LTM应力扫描流变曲线

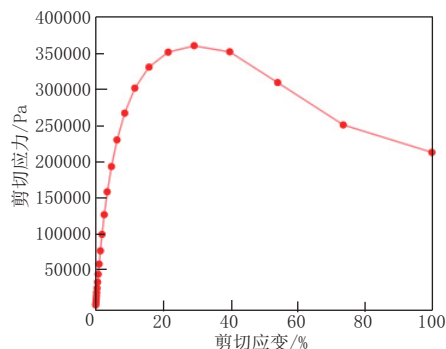


图6 SBS-SAS应力扫描流变曲线

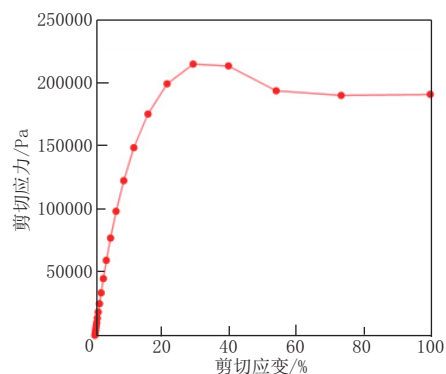


图7 SBS-XT应力扫描流变曲线

由图5至图7可知,SBS-LTM的应力扫描流变曲线表明,其在初始剪切阶段(应变<10%)即表现出显著的抗剪强度,剪切应力迅速达到峰值,显示出材料在初期荷载下的高模量与结构支撑能力。进入中间应变阶段后,剪切应力维持在较低且稳定的水平,反映出材料具备良好的变形适应性与抗疲劳特性,有利于长期服役条件下的性能保持。在高应变阶段,剪切应力随应变显著上升,表明材料具有明显的应变硬化行为,能够在较大变形下持续提供抗剪承载力,这对于重载交通条件下的路面耐久性具有重要意义。整体而言,SBS-LTM的流变曲线呈现“上升-平稳-再上升”的三阶段特征,体现出其在不同应变范围内协调变形与承载的复杂力学行为,综合性能适应多变交通与环境荷载。SBS-SAS和SBS-XT在

初始剪切阶段的抗剪能力更加突出,但当应变 $>30\%$ 后,两种材料的抗剪强度均开始出现显著降低,且流变曲线不再回升,表明两种材料在经历较大应变后,出现了强度失效的情况,在此情况下,材料无法为混合料提供有效的抗剪强度,材料耐久性较差。

3 改性机理分析

傅立叶变换红外光谱(FTIR)是一种基于分子振动和转动能级跃迁的光谱技术,能够识别和量化样品中的化学键和官能团,通过分析沥青的红外光谱,可以获得关于其化学组成、分子结构和官能团的信息^[11]。3种低温改性沥青的红外光谱测试结果如图8至图10所示。

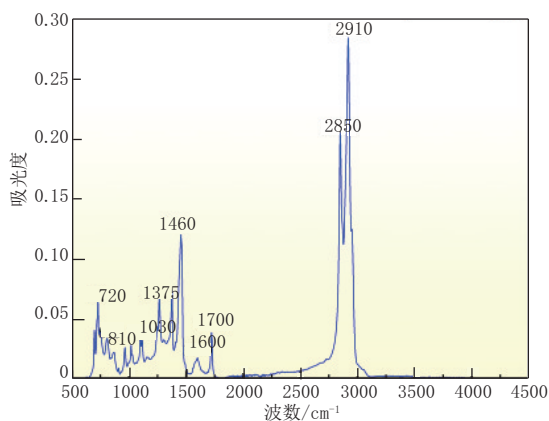


图8 SBS-LTM 傅里叶红外光谱

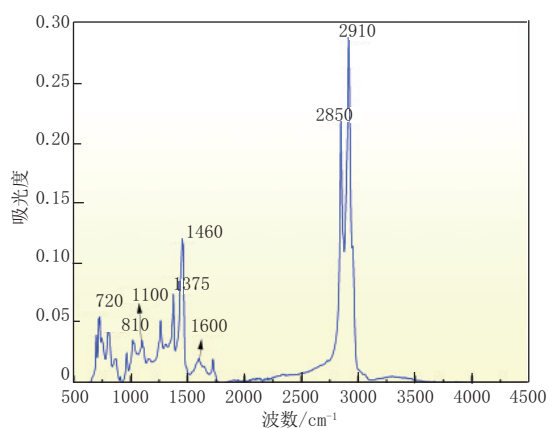


图9 SBS-SAS 傅里叶红外光谱

由图8至图10可知,三者均在 2910 cm^{-1} 、 2850 cm^{-1} 、 1460 cm^{-1} 及 720 cm^{-1} 处均出现明显吸收峰,表明沥青基质以饱和烷烃长链结构为主。

在SBS-LTM体系中,未出现明显相分离峰, 1700 cm^{-1} 处微量羰基不影响SBS与沥青的相容性。SBS-SAS体系在 1600 cm^{-1} 处可见聚苯乙烯芳香环骨架振动的弱吸收,表明SBS分散均匀; 1100 cm^{-1} 附近出现S=O或C-O等极性官能团特征峰,该信号源自

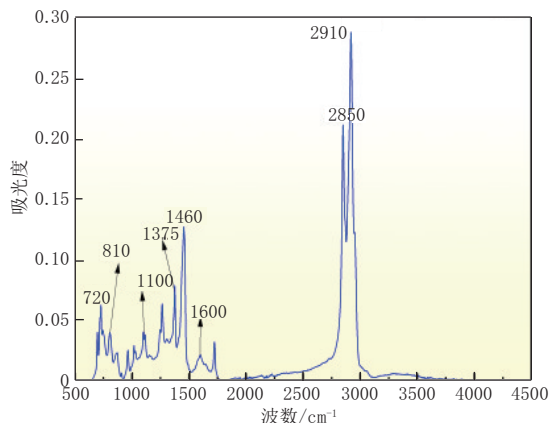


图10 SBS-XT 傅里叶红外光谱图像

SAS添加剂的引入,有助于提升界面相容性与储存稳定性,且 1700 cm^{-1} 附近未见明显羰基峰,反映该体系初始氧化程度较低。SBS-XT体系同样在 1600 cm^{-1} 与 1375 cm^{-1} 处分别检出聚苯乙烯芳香环振动与甲基C-H弯曲振动,证实SBS均匀分散; 1100 cm^{-1} 与 810 cm^{-1} 处的特征吸收归属于XT添加剂引入的含氧、含硅或含硫等极性官能团,进一步增强了体系的相容性与稳定性,且谱图整体未见明显氧化或相分离信号。

三种体系均实现了SBS在沥青中的良好分散,其主要差异体现在添加剂引入的极性官能团种类及其对氧化行为的抑制能力上:SBS-LTM含微量羰基信号,SBS-SAS与SBS-XT则通过特定极性官能团的引入,在提升相容性的同时表现出更优的抗氧化稳定性。

4 结 语

本研究通过常规性能、动态剪切流变及微观结构测试,系统评价了SBS-LTM、SBS-SAS、SBS-XT三种改性沥青的性能差异,主要结论如下:

(1)常规性能方面:SBS-LTM在保持较高软化点的同时,兼具较高的延度,且旋转黏度较母体沥青在 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下降了 35.9% ,表现出温度稳定性优势的同时,施工和易性最佳;SBS-SAS软化点最高,达到了 $102.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,但延度最低,仅 68.67 cm ,低温韧性不足;SBS-XT综合性能优良。

(2)流变性能方面:SBS-LTM在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 18 Hz 的低温高频条件下复数模量达 2.5 MPa ,相位角响应接近母体沥青,具备成熟的能量耗散机制与均衡的疲劳寿命;SBS-SAS因蜡质增强效应模量较高,约 6 MPa ,但过度刚化导致韧性储备下降;SBS-XT流变表现稳定,但长期抗衰减能力有限。

(下转第103页)