

脱硫胶粉/SBS复合改性沥青的制备与性能研究

徐全鹏¹, 侯宗良², 杨波¹, 唐文涛¹, 曹卫东²

¹山东高速潍坊发展有限公司, 山东 潍坊

²山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南

Email: 505047386@qq.com

收稿日期: 2021年1月10日; 录用日期: 2021年2月2日; 发布日期: 2021年2月18日

摘要

为制备适用于桥面铺装防水粘结层的沥青胶结材料, 本文采用脱硫胶粉和SBS改性剂作为改性材料开展了复合改性沥青的制备与性能研究。试验中采用全因子试验方法, 并以70#基质沥青, SBS改性沥青, 单掺12%、15%、18%的脱硫胶粉改性沥青作为对照组进行对比分析。利用针入度试验、延度试验、软化点试验、布氏黏度试验、动态剪切流变试验(DSR)评价复合改性沥青的高温性能、低温性能、疲劳性能。结果表明, 复合改性沥青的高温稳定性、低温性能、抗疲劳性能与70#基质沥青、SBS改性沥青、单掺脱硫胶粉改性沥青相比都得到了一定的改善, 并且经改性后, 其感温性降低。通过综合性对比分析发现, 脱硫胶粉掺量18%、SBS掺量3%的复合改性沥青的性能最优。

关键词

复合改性沥青, 高温稳定性, 低温性能, 抗疲劳性能, 最优掺量

Preparation and Performance Analysis of Composite Modified Bitumen Fabricated with Desulfurized Rubber Powder and SBS Additive

Quanpeng Xu¹, Zongliang Hou², Bo Yang¹, Wentao Tang¹, Weidong Cao²

¹Shandong Expressway Weifang Development Co., Ltd., Weifang Shandong

²School of Qilu Transportation Shandong University, Jinan Shandong

Email: 505047386@qq.com

Abstract

In order to design a type of modified bitumen suitable for waterproof bonding layer, this paper employed base bitumen and incorporated different dosages of desulfurized rubber powder and SBS additive to prepare composite modified bitumen. The penetration test, ductility test, softening point test, Brookfield viscosity test, and dynamic shear rheology test (DSR) were used to evaluate the high temperature performance, low temperature performance and fatigue performance of the composite modified bitumen. The results show that the high-temperature stability, low-temperature performance, and fatigue resistance of the composite modified bitumen were improved to a certain extent compared with the base bitumen and commercial SBS modified bitumen. Based on systematic analysis, the composite modified bitumen with 18% devulcanized rubber powder and 3% SBS additive obtained the best performance.

Keywords

Composite Modified Bitumen, High-Temperature Stability, Low-Temperature Performance, Fatigue Resistance, Optimal Dosage

Copyright © 2021 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

随着我国公路建设的快速发展,改性沥青在公路铺设方面的应用也越来越多,目前国内外常用的改性沥青以 SBS 改性沥青为主。SBS 改性沥青是将热塑性丁苯橡胶(SBS)作为改性剂加入基质沥青制备而成, SBS 是苯乙烯与丁二烯嵌段共聚物,苯乙烯段物理交联可改善沥青的抗高温永久变形能力,而丁二烯段赋予沥青一定的柔韧性。这种特殊的结构,使得 SBS 改性沥青具有良好的高温性能,同时低温性能也得到改善[1] [2]。但是 SBS 作为一种石油制品,价格较高,使 SBS 改性沥青的推广受到一定程度的限制。

胶粉改性沥青在近几年来也有一定规模的应用。将废旧轮胎制成胶粉,作为改性剂加入沥青中制成改性沥青,不仅价格低廉、解决环保压力,而且可以改善沥青的抗老化性能、高低温性能,降低路面噪声[3] [4] [5]。但是胶粉与沥青之间的相容性较差,胶粉改性沥青容易离析,储存稳定性能差,而且胶粉掺量低时改性效果不明显,掺量高时改性沥青粘度大,施工温度高,施工难度大[6] [7] [8]。这些问题也使得胶粉改性沥青无法进行大面积推广使用。

为了生产出性能优异的改性沥青,使两种改性剂实现性能互补,我国部分学者如王志刚[1]、高占华[9]等人提出了 SBS、橡胶粉复合改性沥青的概念。崔晟东对 SBS/橡胶粉复合改性沥青进行经济性分析,发现其不仅性能更优,而且造价更低,具有极大的现实意义[10]。向丽研究了 SBS/橡胶粉的流变行为、热氧老化性能和储存稳定性,同时对废橡胶在沥青中的溶胀机理和溶胀动力学进行了分析[11]。程健对废胶粉进行接枝处理,研究得出低掺量接枝胶粉能有效解决 SBS/废胶粉复合改性沥青的高粘度和离析问题[12]。涂娟、王志刚等人研究发现糠醛抽出油对胶粉有很好的溶胀作用,可以使 SBS/橡胶粉复合改性沥青的延度有很大程度的提高[1] [13]。韦大川认为 SBS/橡胶复合改性沥青表现出了良好的综合性能,并且

SBS/橡胶粉复合改性沥青路面的抗震减噪效果也更明显[14] [15]。郭吉坦、张红兵等人对 SBS/橡胶粉复合改性沥青的生产工艺、合理掺量、材料优选等方面进行了研究[16] [17]。申爱琴, 杨光研究发现 SBS/橡胶粉复合改性沥青混合料在低温环境下依然具备较强的抗塑性变形能力, 并且密级配 SBS/橡胶粉混合料与 SBS 改性沥青混合料相比, 其综合性能有较大的提高[18] [19]。Wang 提出, SBS/胶粉复合改性沥青可以显著提高沥青的粘弹性能和低温性能。在 SBS 掺加量超过 1%时, 改性沥青存在平缓区, 说明体系形成网络结构, 改性沥青性能显著提高[20]。Wang Y 对 SBS/橡胶复合改性沥青的储存稳定性进行改善, 发现其性能符合 SBS 聚合物沥青 c 级标准要求[21]。

综上, SBS/胶粉复合改性沥青已被广泛研究并进行了成功应用, 验证了其优良的使用性能。本文基于前人研究经验, 尝试采用 SBS 改性剂和脱硫胶粉作为改性材料制备复合改性沥青, 作为桥面铺装防水粘结层的基体材料。通过针入度、延度、软化点、布氏黏度、动态剪切流变试验指标的综合分析, 确定改性材料的最佳掺量并为 SBS/脱硫胶粉复合改性沥青在桥面铺装工程中的应用提供理论指导。

2. 试验材料与方法

2.1. 试验原材料

本文基质沥青(Base Bitumen, BA)采用山东某公司生产的 70#道路石油沥青, SBS 改性沥青由山东华瑞道路材料技术有限公司生产, 胶粉为山东某公司采用水油法添加脱硫剂生产的 40 目脱硫胶粉(Desulfurized Rubber Powder, R), SBS 为中国石化某公司生产的线型 SBS。70#基质沥青与 SBS 改性沥青的常规性能见表 1。

Table 1. Conventional performance of 70# matrix bitumen and SBS modified bitumen

表 1. 70#基质沥青与 SBS 改性沥青的常规性能

| 技术指标 | 70#基质沥青 | SBS 改性沥青 | 试验方法 |
|---------------|------------|-----------|------------|
| 25℃针入度/mm | 60.3 | 58 | T0604-2011 |
| 延度/cm | >100 (15℃) | 30.7 (5℃) | T0605-2011 |
| 软化点/℃ | 45.1 | 80.2 | T0606-2011 |
| 135℃布氏黏度/Pa·s | 0.52 | 2.50 | T0625-2011 |

2.2. 改性剂掺量确定

为了确定 SBS/脱硫胶粉复合改性沥青中改性剂的掺量, 在前期预调研基础上同时参考已有文献或成果研究, 并考虑经济性后, 分别选取 SBS 掺量 1%、2%、3%, 脱硫胶粉掺量 12%、15%、18%。本文材料配方采用外掺法, 具体试验方案及配方见表 2。

2.3. 制备工艺确定

复合改性沥青的制备一般分为改性剂溶胀、高速剪切、后期发育三个阶段。具体制备工艺如下:

1) 改性剂溶胀阶段: 将盛放有 70#基质沥青的分装桶放置在 160℃~170℃的烘箱内恒温保存 1 小时。将脱硫胶粉和 SBS 改性剂称取规定质量后一起加入熔融状态的沥青中, 并充分搅拌至均匀状态。再将沥青放入 170℃的烘箱中恒温发育 1 小时, 在此期间每隔 15~20 分钟充分搅拌沥青一次。

2) 高速剪切阶段: 将恒温发育后的沥青进行高速剪切, 剪切速度: 5000 转/分钟, 剪切时间: 1 小时, 温度保持在 180℃~190℃, 不要超过 195℃。

3) 后期发育阶段: 将经高速剪切后的复合改性沥青放置在 170℃的烘箱中恒温发育 1 小时。

Table 2. Compound modified bitumen test plan and material formula
表 2. 复合改性沥青试验方案及材料配方

| 试验编号 | 胶粉掺量 | SBS 掺量 | 样品简称 |
|------|----------|--------|-------|
| 1 | 12% | — | R12 |
| 2 | 12% | 1% | R12S1 |
| 3 | 12% | 2% | R12S2 |
| 4 | 12% | 3% | R12S3 |
| 5 | 15% | — | R15 |
| 6 | 15% | 1% | R15S1 |
| 7 | 15% | 2% | R15S2 |
| 8 | 15% | 3% | R15S3 |
| 9 | 18% | — | R18 |
| 10 | 18% | 1% | R18S1 |
| 11 | 18% | 2% | R18S2 |
| 12 | 18% | 3% | R18S3 |
| 13 | 70#基质沥青 | | BA |
| 14 | SBS 改性沥青 | | SBS |

2.4. 试验方法

2.4.1. 针入度试验

针入度是指标准针在一定的载荷、时间及温度条件下垂直穿过沥青试样的深度，单位是 0.1 mm。其标准试验条件为温度 25℃，载荷 100 g，贯入时间 5 s。沥青的针入度能够反映沥青的黏稠、软硬程度以及高温稳定性和低温抗裂性能，是我国划分沥青标号的指标。具体试验步骤见《JTG E20-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中 T0604-2011 试验方法。

2.4.2. 延度试验

延度是沥青在一定温度下，按照一定速度拉伸至沥青断裂时的长度，单位为 cm，通常采用的试验温度为 25℃、15℃、5℃，拉伸速度为 5 cm/min ± 0.25 cm/min。沥青的延度能够表征沥青所能承受塑性变形的总能力，既反映了沥青路面的低温抗裂性能，也间接反映沥青的黏度和剪切敏感性。延度值越大，沥青塑性越好，低温性能越好。根据《JTG F 40-2004 公路沥青路面施工技术规范》、《JT / T 798-2019 路用废胎胶粉橡胶沥青》两部规范中对复合改性沥青延度试验的温度要求，本文采用 5℃延度值来评价复合改性沥青的低温性能。具体试验步骤见《JTG E20-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中 T0605-2011 试验方法。

2.4.3. 软化点试验

软化点是指沥青试件在升温速率一定的条件下，受热软化后下垂时的温度，是沥青从粘塑性状态转变为粘流状态的临界温度指标。软化点指标所表征的是沥青的黏度、高温稳定性以及温度敏感性，是评价沥青性能的重要指标。在一定范围内，软化点越高，沥青的高温稳定性越好。具体试验步骤见《JTG E20-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中 T0606-2011 试验方法。

2.4.4. 布氏黏度试验

布氏黏度试验采用美国 Brookfield 公司 Brookfield DV II 旋转黏度仪，它是通过测定浸没在沥青试样中的纺锤形轴以一定速度旋转所需的扭矩来确定旋转粘度，是用来评价沥青的高温稳定性和工作特性的

设备。本文在试验中转子转速采用 20 r/min, 转子选用 21 号、27 号、28 号、29 号转子, 试验温度分别为 120℃、140℃、160℃、180℃。各项测试都必须保证扭矩在 10%~98%之间。具体试验步骤见《JTG E20-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中 T0625-2011 试验方法。

2.4.5. 动态剪切流变试验

动态剪切流变仪(DSR)是一种评价高分子材料流变特性的通用仪器,通过美国 SHRP 计划引入到沥青研究中,综合考虑了加载情况、温度对沥青胶结料性能的影响,用来测定其高温性能和中等温度下的疲劳特性。该试验是将厚度 1 mm 或 2 mm 的沥青试样夹在两块直径为 25 mm 或 8 mm 的平板间;其中一块固定,一块绕中心轴以角速度 ω 来回摆动,得出在不同温度下试样的复数模量 G^* 、相位角 δ 、车辙因子($G^*/\sin\delta$)等指标。本文采用温度扫描模式对在 40℃~88℃范围内进行测试,温度间隔为 6℃,选取转子直径为 25 mm,转子与 DSR 夹具的下平行板间隙控制在 1 mm,扫描频率为 10 rad/s。具体试验步骤见《JTG E20-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中 T0628-2011 试验方法。

3. 试验结果与分析

3.1. 针入度试验

针入度能够反映沥青的黏稠、软硬程度以及高温稳定性和低温抗裂性能,是我国划分沥青标号的指标。针入度越大,表明沥青越软,即高温性能不足。不同掺量的复合改性沥青的针入度如图 1 所示。从图 1 可以看出:不同掺量的复合改性沥青的针入度值皆小于 BA 和 SBS,这表明复合改性沥青的高温稳定性优于 BA 和 SBS。原因在于:脱硫胶粉、SBS 改性剂会吸附沥青中轻质组分,发生溶胀反应。在高温高速剪切作用下,脱硫胶粉、SBS 改性剂均匀地分散在沥青中,与沥青形成三维网络结构,这种网状结构限制了沥青的流动,沥青的粘稠度增大,针入度下降,表现为复合改性沥青变硬[22],高温稳定性增强。

当脱硫胶粉掺量一定时,随着 SBS 改性剂掺量的增加,复合改性沥青的针入度值逐渐减小,这说明添加 SBS 改性剂可以使其与沥青形成三维网络结构,有效地提高了复合改性沥青的高温稳定性。同理,添加脱硫胶粉也可以有效改善复合改性沥青的高温稳定性,但改善效果不如 SBS 改性剂明显。

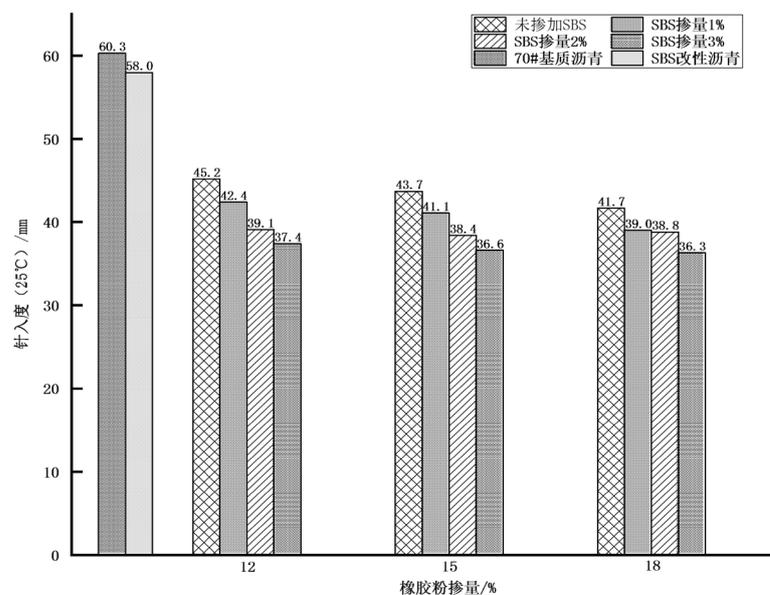


Figure 1. Penetration value of compound modified bitumen with different dosage
图 1. 不同掺量的复合改性沥青的针入度值

3.2. 延度试验

延度既反映了沥青路面的低温抗裂性能，也间接反映了沥青的黏度和剪切敏感性。延度值越大，沥青塑性越好，低温性能越好。不同掺量的复合改性沥青的延度值和规范要求的复合改性沥青的延度值分别如图 2 和表 3 所示。

由图 2 可以看出：SBS 改性剂和脱硫胶粉的加入显著提高了复合改性沥青的 5℃延度值，这表明各掺量复合改性沥青的低温性能和塑性要远大于 BA，并且接近 SBS 的水平。原因在于：低温条件下，沥青分子间的相互作用明显减弱，表现为基质沥青延度下降，而 SBS 改性剂在低温下依然具备良好的变形能力。受到外力作用时，虽然沥青变形能力不足，但是两种改性剂与沥青的网络交联结构可以沿着力的方向产生形变，同时脱硫胶粉的良好弹性有效地消散应力，SBS 改性剂和脱硫胶粉将代替沥青成为形变的主要承受对象，因此沥青的延度随 SBS 改性剂、脱硫胶粉掺量增加不断增大。但当 SBS 改性剂、脱硫橡胶粉含量过大时会吸收沥青中过多的轻质组分，导致 SBS 和脱硫胶粉溶胀不充分，使复合改性沥青的低温延度有所下降[22]。通过与表 3 和规范值相比，仅有 R12、R15、R18 这 3 种脱硫胶粉改性沥青和 R12S1、R12S2 这两种复合改性沥青不满足规范要求，其余大部分复合改性沥青均超过规范要求。

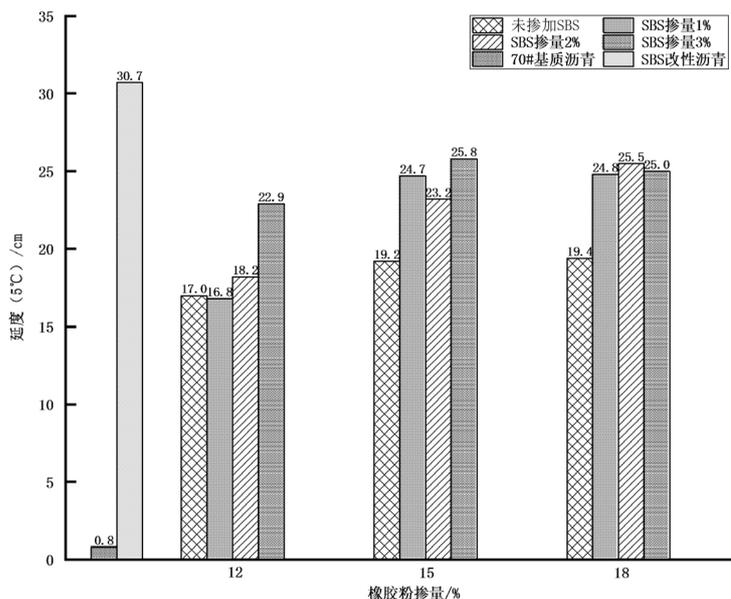


Figure 2. Ductility value of compound modified bitumen with different dosage
图 2. 不同掺量的复合改性沥青的延度值

Table 3. The ductility value of the composite modified bitumen as required by the specification
表 3. 规范要求的复合改性沥青的延度值

| 规范 | 延度(5℃)/cm |
|------------------------------|-----------|
| 《JTG F 40-2004 公路沥青路面施工技术规范》 | ≥20 |
| 《JT/T 798-2019 路用废轮胎胶粉橡胶沥青》 | ≥20 |

当 SBS 改性剂掺量一定时，随着脱硫胶粉掺量的增加，复合改性沥青的延度值逐渐增加，这说明添加脱硫胶粉可以有效地消散应力，使其代替沥青成为形变的主要承受对象，起到改善复合改性沥青低温性能的效果。同理，添加 SBS 改性剂也可使复合改性沥青的延度值有增大的趋势，但对其低温性能的改善不如脱硫胶粉明显。

3.3. 软化点试验

软化点所表征的是沥青的黏度、高温稳定性以及温度敏感性，是评价沥青性能的重要指标。在一定范围内，软化点越高表明沥青的高温稳定性越好。不同掺量的复合改性沥青的软化点如图 3 所示。从图 3 可以看到：各复合改性沥青的软化点均大于 BA，这表明两种改性材料显著提高了复合改性沥青的高温稳定性。原因在于：在高温和高速剪切的共同作用下，SBS 改性剂、脱硫胶粉被均匀地分散在沥青中，两种改性剂吸收轻质油分发生溶胀，导致沥青中胶质和沥青质的相对含量升高，使复合改性沥青更加黏稠，从而引起软化点升高[22]。

其中，当脱硫胶粉掺量一定时，随着 SBS 改性剂的增加，复合改性沥青的软化点有逐渐增大的趋势，这表明添加 SBS 改性剂可以改善复合改性沥青的高温稳定性。而当 SBS 改性剂掺量一定时，随着脱硫胶粉掺量的增加，复合改性沥青的软化点呈现先降低后增加的趋势，并且 SBS 改性剂掺量一定，脱硫胶粉掺量为 12%、18%的复合改性沥青的软化点相差不多。这说明脱硫胶粉掺量过多会导致其在沥青中溶胀不充分，无法充分发挥作用。若考虑经济因素，可以考虑选用脱硫胶粉掺量 12%的复合改性沥青。

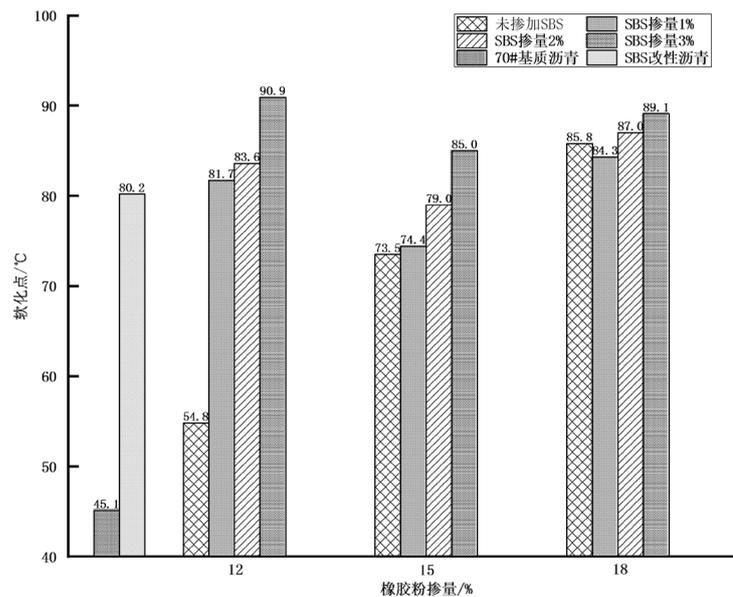


Figure 3. Softening point value of compound modified bitumen with different dosage

图 3. 不同掺量的复合改性沥青的软化点值

3.4. 布氏黏度试验

Table 4. Results of linear analysis of viscosity and temperature of composite modified bitumen with different dosage
表 4. 不同掺量的复合改性沥青的黏度与温度线性分析结果

| 样品简称 | 回归方程 | R ² | 黏温指数(VTS) |
|-------|-------------------------|----------------|-----------|
| R12 | $y = -2.5108x + 7.0514$ | $R^2 = 0.9961$ | 2.5108 |
| R12S1 | $y = -2.2736x + 6.4528$ | $R^2 = 0.9904$ | 2.2736 |
| R12S2 | $y = -2.1074x + 6.0395$ | $R^2 = 0.9992$ | 2.1074 |
| R12S3 | $y = -1.6576x + 4.8821$ | $R^2 = 0.9164$ | 1.6576 |
| R15 | $y = -2.2977x + 6.5155$ | $R^2 = 0.9997$ | 2.2977 |

Continued

| | | | |
|-------|-------------------------|----------------|--------|
| R15S1 | $y = -2.0233x + 5.8184$ | $R^2 = 0.9990$ | 2.0233 |
| R15S2 | $y = -1.8633x + 5.42$ | $R^2 = 0.9895$ | 1.8633 |
| R15S3 | $y = -2.1776x + 6.2596$ | $R^2 = 0.9840$ | 2.1776 |
| R18 | $y = -2.1824x + 6.2372$ | $R^2 = 0.9985$ | 2.1824 |
| R18S1 | $y = -1.7841x + 5.2176$ | $R^2 = 0.9961$ | 1.7841 |
| R18S2 | $y = -2.1565x + 6.2021$ | $R^2 = 0.9974$ | 2.1565 |
| R18S3 | $y = -1.9932x + 5.7956$ | $R^2 = 0.9833$ | 1.9932 |
| BA | $y = -3.3814x + 9.2189$ | $R^2 = 0.9998$ | 3.3814 |
| SBS | $y = -2.966x + 8.2658$ | $R^2 = 0.9991$ | 2.9660 |

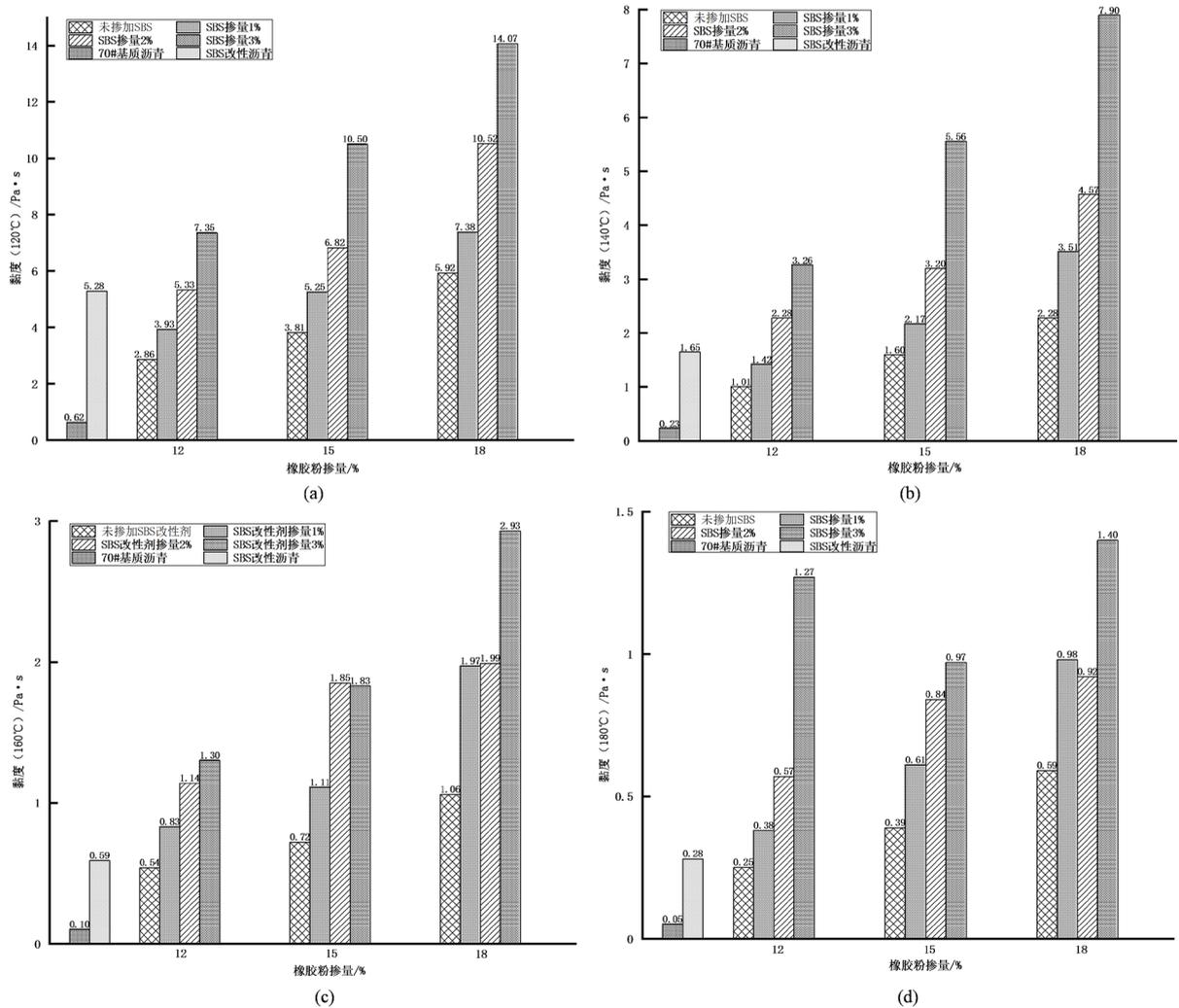


Figure 4. Viscosity of composite modified bitumen with different dosage at 120°C, 140°C, 160°C, 180°C
 图 4. 不同掺量的复合改性沥青分别在 120°C、140°C、160°C、180°C 下的黏度

布氏黏度试验主要是测试沥青的高温性能和粘结性能。不同掺量的复合改性沥青分别在 120°C、140°C、160°C、180°C 下的黏度如图 4 所示。从图中可以看到：在脱硫胶粉(或 SBS 改性剂)掺量一定的情

况下,随着 SBS 改性剂(或脱硫胶粉)掺量的增加,复合改性沥青在 4 种温度(120℃、140℃、160℃、180℃)下的旋转粘度都有不同程度的增大,其中 120℃和 140℃时的旋转粘度增幅比较明显,这表明加入两种改性材料后,沥青中胶质和沥青质含量增多,复合改性沥青更加黏稠,从而导致其粘结性增大,有效改善了沥青的高温性能。

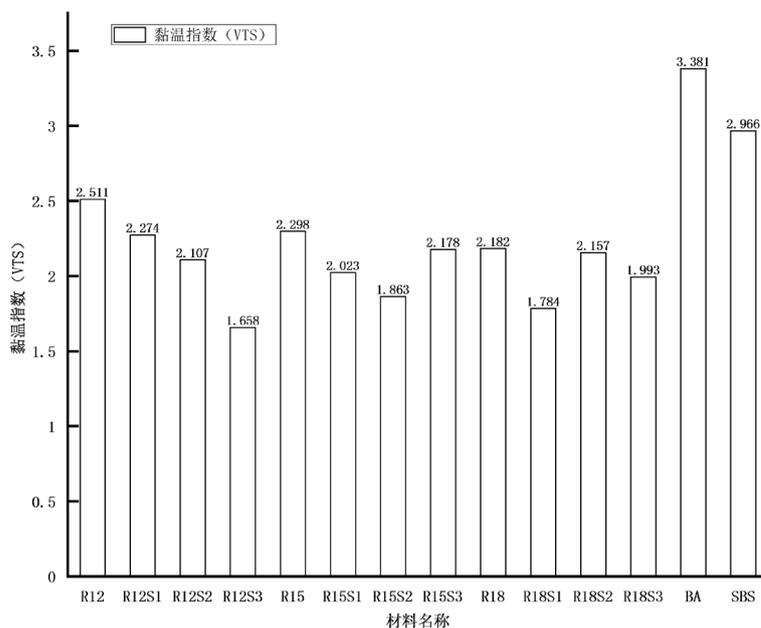


Figure 5. VTS of composite modified bitumen with different dosage
图 5. 不同掺量的复合改性沥青的黏温指数(VTS)

复合改性沥青是一种典型的温度敏感型材料,由图中可以看到,当脱硫胶粉、SBS 改性剂掺量一定时,随着温度的升高,各复合改性沥青的黏度逐渐下降,可以采用黏温指数(VTS)来进一步评价不同掺量下复合改性沥青的温度敏感性。

对黏度取双对数、开氏温度取对数进行线性分析,可以得到各掺量情况下的线性回归方程,其中回归方程斜率的绝对值便是黏温指数(VTS)。除针入度指数外,道路工程中常用黏温指数(VTS)评价沥青的温度敏感性,VTS 值越小,说明黏度随温度的变化幅度越缓,则该复合改性沥青的感温性越好。不同掺量的复合改性沥青的黏温指数(VTS)如表 4、图 5 所示。

由表 4、图 5 可以看出,R12S3、R15S2、R18S1、R18S3 这 4 组复合改性沥青的感温性较好。

3.5. 动态剪切流变试验

3.5.1. 复数剪切模量变化规律

复数剪切模量 G^* 是材料重复剪切变形时总阻力的度量,包括两部分:实数部分储存弹性模量和虚数部分损失弹性模量。复数剪切模量 G^* 表征了沥青抵抗变形的能力,其值越大,沥青抵抗变形的能力越强。不同掺量的复合改性沥青的复数剪切模量结果如表 5 所示。对复数剪切模量取对数,舍去下降幅度比 SBS 大的 R12S1、R12S2、R15S1 这 3 种复合改性沥青的曲线后,得到图 6。

由图 6 可见,各复合改性沥青的复数剪切模量均随着温度的升高而逐渐降低,并且不同温度下的各复合改性沥青的复数剪切模量均大于 BA,这表明复合改性沥青抵抗变形的能力和高温稳定性比 BA 更强。这是因为随着 SBS 改性剂、脱硫胶粉的加入,其与沥青之间形成网络交联结构,沥青中沥青质和胶质含

量逐渐增多，黏度增大，导致复合改性沥青的高温性能变强，加之脱硫胶粉有良好的弹性，可有效抵抗变形。

Table 5. Results of complex shear modulus of composite modified bitumen with different dosage
表 5. 不同掺量的复合改性沥青的复数剪切模量结果

| 样品简称 | 温度/°C | | | | | | | | |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| | 40 | 46 | 52 | 58 | 64 | 70 | 76 | 82 | 88 |
| R12 | 94.97 | 55.20 | 29.23 | 14.56 | 7.08 | 3.53 | 1.83 | 1.06 | 0.59 |
| R12S1 | 137.81 | 83.84 | 44.44 | 23.18 | 12.09 | 6.05 | 3.15 | 1.68 | 1.01 |
| R12S2 | 147.73 | 90.16 | 49.64 | 26.63 | 14.13 | 7.80 | 4.09 | 2.16 | 1.28 |
| R12S3 | 155.60 | 96.77 | 54.49 | 30.20 | 16.92 | 9.38 | 5.12 | 2.97 | 1.79 |
| R15 | 94.89 | 56.46 | 30.90 | 16.37 | 8.62 | 4.51 | 2.41 | 1.45 | 0.85 |
| R15S1 | 136.15 | 83.36 | 46.13 | 24.79 | 13.52 | 7.10 | 3.78 | 2.04 | 1.24 |
| R15S2 | 150.62 | 94.63 | 51.37 | 28.24 | 15.02 | 8.21 | 4.53 | 2.47 | 1.53 |
| R15S3 | 156.02 | 99.22 | 54.72 | 30.50 | 16.89 | 9.32 | 5.25 | 3.08 | 1.83 |
| R18 | 97.86 | 62.17 | 33.87 | 18.48 | 10.27 | 5.56 | 3.19 | 2.00 | 1.21 |
| R18S1 | 140.03 | 84.97 | 48.11 | 26.47 | 14.35 | 7.76 | 4.32 | 2.60 | 1.53 |
| R18S2 | 139.62 | 90.09 | 50.40 | 28.78 | 16.35 | 9.31 | 5.59 | 3.10 | 1.97 |
| R18S3 | 158.71 | 98.74 | 58.20 | 33.08 | 19.24 | 11.08 | 6.45 | 3.95 | 2.25 |
| BA | 80.89 | 42.10 | 19.06 | 8.16 | 3.62 | 1.55 | 0.76 | 0.37 | 0.19 |
| SBS | 118.04 | 70.54 | 39.05 | 21.51 | 12.12 | 6.71 | 3.80 | 2.38 | 1.42 |

与 SBS 相比，R12S3、R15S2、R15S3、R18S1、R18S2、R18S3 这 6 种复合改性沥青的变化幅度相对较小，其高温稳定性和抵抗变形的能力要优于 SBS，其中 R18S3 复合改性沥青的变化幅度最小，性能最优。

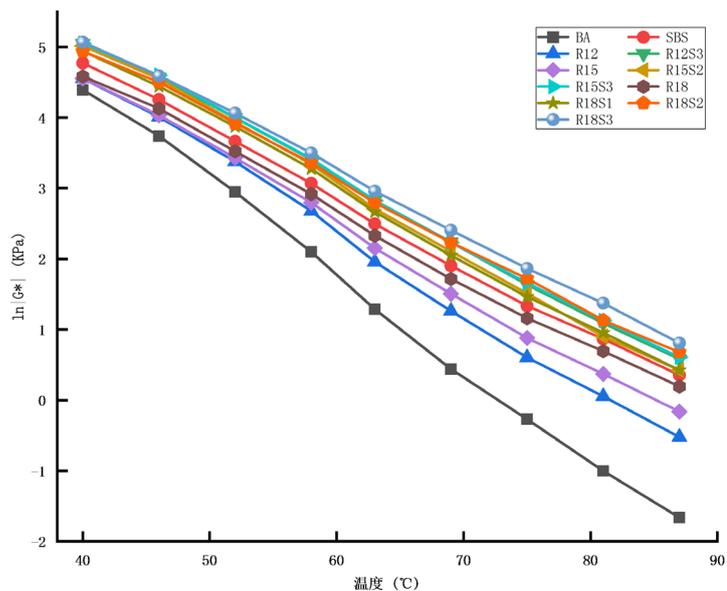


Figure 6. Change of complex shear modulus of compound modified bitumen with different dosage

图 6. 不同掺量的复合改性沥青的复数剪切模量变化

3.5.2. 相位角变化规律

相位角 δ 是由于材料粘性成分的影响，当对材料输入正弦应力与产生的正弦应变响应不同步，滞后一个角度而产生的。反映了沥青胶结料的弹性与粘性的成分比例。在高温条件下， δ 越大，沥青黏性成分越大，反之 δ 越小，表明该材料弹性成分所占比例较大，即有较好的抵抗高温变形能力。不同掺量的复合改性沥青的相位角变化如图 7 所示。

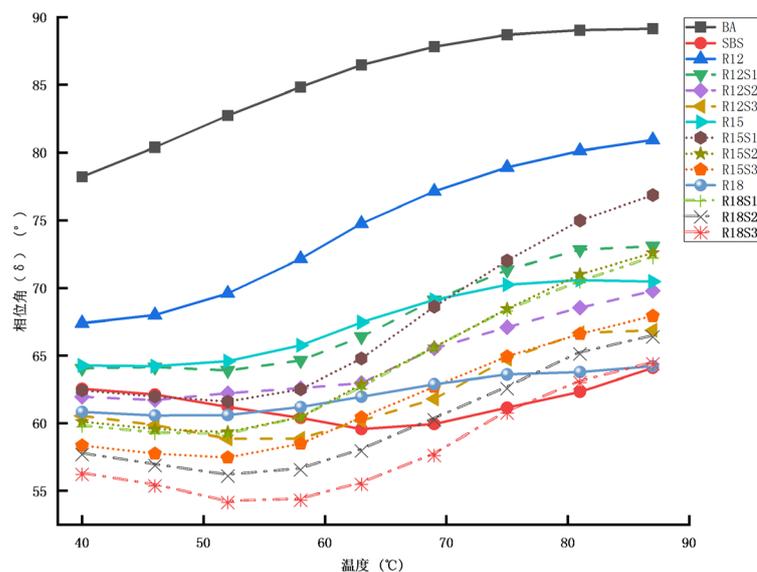


Figure 7. Phase angle changes of compound modified bitumen with different dosage

图 7. 不同掺量的复合改性沥青的相位角变化

由图 7 可见，相同温度下，不同掺量的复合改性沥青相位角不同，随着 SBS 改性剂、脱硫胶粉掺量的增加，相位角 δ 呈减小趋势。这说明 SBS 改性剂、脱硫胶粉在高温和剪切作用下均匀分散在沥青中，形成网络交联结构，限制了沥青的流动，并且脱硫胶粉具有一定的弹性，从而增强了复合改性沥青抵抗永久变形的能力。复合改性沥青的相位角 δ 显著小于 BA，说明复合改性沥青比 BA 具有更好的弹性恢复性能。在低于 64°C 温度状态下，各复合改性沥青的弹性恢复能力高于 SBS；当温度高于 64°C 时，R18S2 和 R18S3 的高温弹性恢复性能与 SBS 相当。

3.5.3. 车辙因子变化规律

车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 是沥青高温性能的评价指标，其值越大，沥青的高温抗车辙性能越强。不同掺量的复合改性沥青的车辙因子计算结果如表 6 所示。将车辙因子取对数，舍去变化幅度比 SBS 大的 R12S1、R12S2、R15S1、R15S2 这 4 种复合改性沥青的曲线后，得到图 8。

由表 6 和图 8 可看出，各复合改性沥青的车辙因子均随温度的增加而逐渐减小。其中 SBS 和 9 种复合改性沥青的车辙因子比 BA、R12、R15 的车辙因子要高，说明复合改性沥青的高温稳定性要比 BA、脱硫胶粉改性沥青的高温稳定性更强。原因在于：SBS 改性剂、脱硫胶粉在高温和高速剪切的共同作用下被均匀分散在沥青中，可使沥青中胶质和沥青质含量增多，有利于在沥青内部形成三维网络结构，限制沥青的流动，从而增强沥青的高温稳定性，并且脱硫胶粉具有一定的弹性，可以消散应力、抵抗形变，有效增强了沥青的高温抗车辙能力。

与 SBS 相比可以发现：R12S3、R15S3、R18S1、R18S2、R18S3 这 5 种复合改性沥青的变化幅度相

对较小, 其高温稳定性能比 SBS 更优。其中, R15S2 复合改性沥青的高温稳定性能和 SBS 基本相当, R18S3 复合改性沥青的高温稳定性能最优。

Table 6. Results of rutting factor of composite modified bitumen with different dosage
表 6. 不同掺量的复合改性沥青的车辙因子结果

| 样品简称 | 温度/°C | | | | | | | | |
|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| | 40 | 46 | 52 | 58 | 64 | 70 | 76 | 82 | 88 |
| R12 | 102.87 | 59.53 | 31.18 | 15.30 | 7.34 | 3.62 | 1.86 | 1.07 | 0.60 |
| R12S1 | 153.24 | 93.16 | 49.48 | 25.65 | 13.20 | 6.47 | 3.33 | 1.76 | 1.05 |
| R12S2 | 167.36 | 102.38 | 56.10 | 29.99 | 15.86 | 8.57 | 4.44 | 2.32 | 1.37 |
| R12S3 | 178.68 | 111.89 | 63.66 | 35.28 | 19.50 | 10.64 | 5.66 | 3.23 | 1.94 |
| R15 | 105.33 | 62.70 | 34.21 | 17.96 | 9.33 | 4.83 | 2.56 | 1.54 | 0.90 |
| R15S1 | 153.58 | 94.41 | 52.43 | 27.94 | 14.95 | 7.62 | 3.98 | 2.11 | 1.27 |
| R15S2 | 173.72 | 109.75 | 59.71 | 32.46 | 16.88 | 9.02 | 4.87 | 2.61 | 1.60 |
| R15S3 | 183.25 | 117.31 | 64.90 | 35.77 | 19.42 | 10.49 | 5.80 | 3.36 | 1.98 |
| R18 | 112.06 | 71.37 | 38.87 | 21.08 | 11.64 | 6.25 | 3.56 | 2.23 | 1.35 |
| R18S1 | 162.13 | 98.90 | 56.07 | 30.46 | 16.17 | 8.53 | 4.65 | 2.76 | 1.60 |
| R18S2 | 165.18 | 107.57 | 60.73 | 34.49 | 19.29 | 10.72 | 6.30 | 3.41 | 2.15 |
| R18S3 | 190.96 | 120.01 | 71.80 | 40.72 | 23.36 | 13.12 | 7.39 | 4.43 | 2.49 |
| BA | 82.64 | 42.70 | 19.22 | 8.19 | 3.63 | 1.56 | 0.76 | 0.37 | 0.19 |
| SBS | 133.00 | 79.79 | 44.56 | 24.74 | 14.05 | 7.75 | 4.34 | 2.69 | 1.58 |

将车辙因子与温度进行拟合, 分析各复合改性沥青的感温性, 抗车辙因子随温度变化趋势可用如下公式表示:

$$\frac{G^*}{\sin \delta} = Ae^{BT}$$

式中: $G^*/\sin \delta$ 为车辙因子, KPa; T 为温度, °C; A、B 为回归系数。

B 的绝对值越小, 表明复合改性沥青的感温性越小。不同复合改性沥青的抗车辙因子与温度回归结果见表 7。

由表 7 可以看出, 不同掺量的复合改性沥青的车辙因子的感温性不同。总体来看, 在脱硫胶粉(或 SBS 改性剂)掺量一定的情况下, 复合改性沥青抗车辙因子的感温性随着 SBS 改性剂(或脱硫胶粉)掺量的增加而减小。这说明在高温、高速剪切的作用下, 添加两种改性剂可以使沥青内部的沥青质和胶质增多, 促使在沥青内部形成三维网络结构, 限制了沥青的流动, 在降低沥青感温性的同时也增强了复合改性沥青的高温稳定性、抗永久变形能力。R12S3、R15S2、R18S1、R18S2、R18S3 这 5 种复合改性沥青和 SBS 的感温性小, 高温稳定性能优。

Table 7. Fitting results of rutting factor ($G^*/\sin \delta$) and temperature of composite modified bitumen with different dosage
表 7. 不同掺量的复合改性沥青车辙因子($G^*/\sin \delta$)与温度拟合结果

| 样品简称 | 拟合数据 | | | |
|-------|-------------------------|--------|--------|-------------------------|
| | 方程 | A | B | R ² |
| R12 | $y = 9324.6e^{-0.112x}$ | 9324.6 | -0.112 | R ² = 0.9985 |
| R12S1 | $y = 12826e^{-0.109x}$ | 12826 | -0.109 | R ² = 0.9989 |
| R12S2 | $y = 11501e^{-0.104x}$ | 11501 | -0.104 | R ² = 0.9994 |

Continued

| | | | | |
|-------|-------------------------|--------|--------|----------------|
| R12S3 | $y = 9558.5e^{-0.098x}$ | 9558.5 | -0.098 | $R^2 = 0.9994$ |
| R15 | $y = 6712.2e^{-0.103x}$ | 6712.2 | -0.103 | $R^2 = 0.9988$ |
| R15S1 | $y = 10833e^{-0.104x}$ | 10833 | -0.104 | $R^2 = 0.999$ |
| R15S2 | $y = 11081e^{-0.102x}$ | 11081 | -0.102 | $R^2 = 0.9991$ |
| R15S3 | $y = 9865.7e^{-0.098x}$ | 9865.7 | -0.098 | $R^2 = 0.9993$ |
| R18 | $y = 5313.1e^{-0.096x}$ | 5313.1 | -0.096 | $R^2 = 0.9985$ |
| R18S1 | $y = 9205.8e^{-0.1x}$ | 9205.8 | -0.1 | $R^2 = 0.9992$ |
| R18S2 | $y = 7573.6e^{-0.094x}$ | 7573.6 | -0.094 | $R^2 = 0.9993$ |
| R18S3 | $y = 8253.1e^{-0.093x}$ | 8253.1 | -0.093 | $R^2 = 0.9996$ |
| BA | $y = 16084e^{-0.131x}$ | 16084 | -0.131 | $R^2 = 0.9988$ |
| SBS | $y = 5909.4e^{-0.095x}$ | 5909.4 | -0.095 | $R^2 = 0.9994$ |

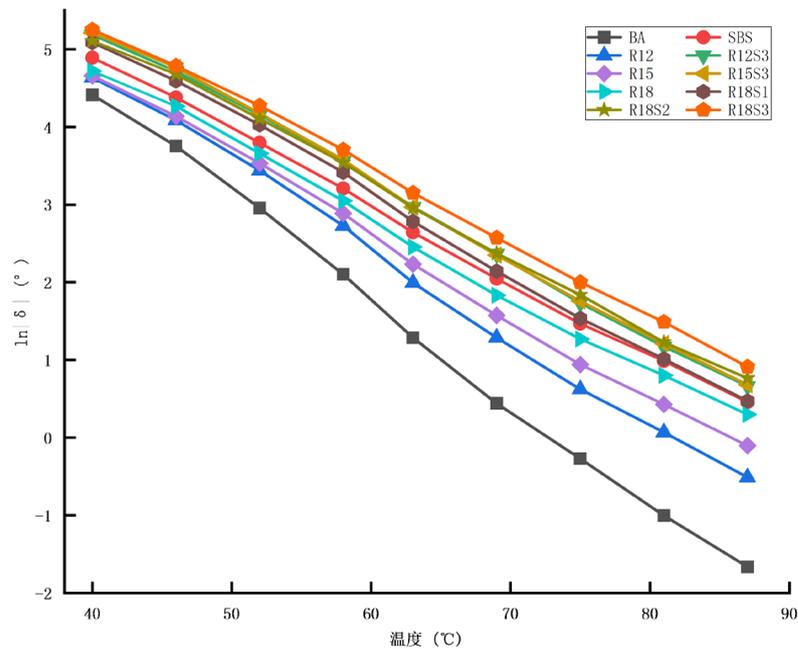


Figure 8. Change of rutting factor of compound modified bitumen with different dosage

图 8. 不同掺量的复合改性沥青的车辙因子变化

4. 结语

1) 采用脱硫胶粉、SBS 改性剂改性的 70#基质沥青, 可使其针入度、相位角降低, 软化点、延度、复数剪切模量、车辙因子增大, 说明其高温稳定性能、低温性能、抗疲劳性能与 70#基质沥青、SBS 改性沥青、单掺脱硫胶粉改性沥青相比都得到了一定的改善, 并且经改性后, 其感温性降低。

2) 经过综合分析, 在不考虑经济成本的情况下, 脱硫胶粉掺量 18%、SBS 掺量 3%的复合改性沥青性能最优; 若考虑经济成本, 则可采用脱硫胶粉掺量 12%、SBS 掺量 3%或脱硫胶粉掺量 15%、SBS 掺量 3%这两种复合改性沥青进行代替。

3) 在后续的研究中, 可考虑采用沥青弯曲蠕变劲度试验(BBR)、老化试验(RTFOT)对复合改性沥青的低温性能、老化性能做进一步研究。

参考文献

- [1] 王志刚, 杜英, 向丽, 程健. 废橡胶粉/SBS 复合改性沥青制备研究[J]. 石油炼制与化工, 2010, 41(4): 27-30.
- [2] 刘朝晖, 柳力, 史进, 李盛. SBS/胶粉复合改性沥青制备工艺及路用性能[J]. 中国科技论文, 2012, 7(11): 853-856.
- [3] 袁德明, 刘冬, 廖克俭. 废旧橡胶粉改性沥青研究进展[J]. 合成橡胶工业, 2007(2): 159-162.
- [4] 郭朝阳, 何兆益, 曹阳. 废胎胶粉改性沥青改性机理研究[J]. 中外公路, 2008(2): 172-176.
- [5] 向丽, 程健. 废橡胶粉改性道路沥青的制备工艺和性能研究[J]. 石油沥青, 2008(1): 12-14.
- [6] 刘贞鹏. SBS/橡胶复合改性沥青混合料高温性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [7] Guillaumot, F., Goujard, L., Simard, D., et al. (2013) Influence of Interface Energy on Compatibility between Ground Tyre Rubber and Bitumen Used in Bitumen Pavement. *Road Materials & Pavement Design*, **14**, 372-383. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.796890>
- [8] 张晓亮, 陈华鑫, 张奔, 况栋梁. 不同来源橡胶粉对橡胶沥青性能影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(5): 1-8.
- [9] 高占华, 王联芳, 赵海云. 橡胶粉/SBS 复合改性沥青路面性能试验研究及工程应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016, 12(1): 62-64.
- [10] 崔晟东. SBS/橡胶粉复合改性沥青经济分析[J]. 北方交通, 2016(2): 31-34.
- [11] 向丽. 废橡胶粉/SBS 复合改性沥青的机理和性能研究[D]: [博士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2011.
- [12] 程健, 占博川. 苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物/废胶粉复合改性沥青的制备[J]. 武汉工程大学学报, 2012, 34(6): 8-12.
- [13] 涂娟, 袁军, 包传平, 程健. 废橡胶粉对 SBS 改性沥青的老化性能影响研究[J]. 武汉工程大学学报, 2009, 31(3): 19-22.
- [14] 韦大川, 王云鹏, 李世武, 邱雪鹏, 冉祥海, 姬相玲. 橡胶粉与 SBS 复合改性沥青路用性能与微观结构[J]. 吉林大学学报(工学版), 2008(3): 525-529.
- [15] 韦大川. 橡胶粉/SBS 复合改性沥青降噪试验研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [16] 郭吉坦, 张波. SBS 与橡胶粉复合改性沥青性能研究[J]. 新型建筑材料, 2010, 37(5): 66-69.
- [17] 张红兵, 马吉倩, 王威娜. SBS-橡胶粉复合改性沥青原材料优选研究[J]. 公路工程, 2020, 45(3): 216-222.
- [18] 杨光, 申爱琴, 陈志国, 于丽梅. 季冻区橡胶粉/SBS 复合改性沥青工厂化参数分析与性能评价[J]. 公路交通科技, 2015, 32(12): 29-37.
- [19] 杨光, 申爱琴, 陈志国, 于丽梅. 废旧橡胶粉与 SBS 复合改性沥青混合料路用性能及应用技术[J]. 公路交通科技, 2016, 33(4): 25-31.
- [20] Wang, X.B., et al. (2015) Investigation of the Rheological Properties and Storage Stability of CR/SBS Modified Bitumen. *Construction & Building Materials*, **74**, 235-240.
- [21] Wang, Y., Zhan, B.C. and Cheng, J. (2012) Study on Preparation Process of SBS/Crumb Rubber Composite Modified Bitumen. *Advanced Materials Research*, **450-451**, 417-422. <https://doi.org/10.4028/scientific5/AMR.450-451.417>
- [22] 郭浩然. SBS/橡胶复合改性沥青性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.