

不同掺量聚氨酯改性沥青性能试验研究

许方勇

武汉都市区环线北段投资管理有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年3月30日; 录用日期: 2025年4月21日; 发布日期: 2025年5月7日

摘要

本研究聚焦于聚氨酯改性沥青, 系统制备了不同掺量的改性沥青及混合料, 运用多种实验手段对其高温、低温、力学及耐久性能展开全面研究。结果表明, 聚氨酯的加入能显著优化沥青性能, 不同掺量和制备工艺对性能影响各异。该研究为聚氨酯改性沥青在道路工程中的合理应用提供了详实的理论依据与数据支撑, 有助于推动高性能道路材料的发展。

关键词

聚氨酯改性沥青, 性能影响因素, 道路性能优化, 制备工艺对比, 耐久性研究

Experimental Study on Properties of Polyurethane Modified Asphalt with Different Contents

Fangyong Xu

Wuhan City Circle Line North Section Investment Management Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: Mar. 30th, 2025; accepted: Apr. 21st, 2025; published: May 7th, 2025

Abstract

This study focused on polyurethane modified asphalt. A series of modified asphalts and mixtures with different polyurethane contents were systematically prepared. Various experimental methods were employed to conduct a comprehensive investigation into their high-temperature, low-temperature, mechanical, and durability properties. The results indicate that the incorporation of polyurethane can significantly optimize the performance of asphalt, with different contents and preparation processes having varied effects on the properties. This research provides a detailed theoretical basis and data support for the rational application of polyurethane modified asphalt in road

engineering, and it is conducive to promoting the development of high-performance road materials.

Keywords

Polyurethane Modified Asphalt, Performance Influencing Factors, Road Performance Optimization, Preparation Technology Comparison, Durability Study

Copyright © 2025 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

在沥青路面在长期服役过程中,不可避免地受到复杂多变的自然环境因素[1]-[4],如高温、低温、降水等,以及繁重交通荷载的双重作用。在高温条件下,沥青路面容易出现车辙、拥包等病害,影响行车安全与舒适性;在低温环境中,有可能产生收缩裂缝,降低路面结构的整体性和耐久性;而在水分的长期侵蚀下,还会引发水损害,导致沥青与骨料的粘结力下降,进而出现松散、坑洼等问题。这些病害不仅缩短了路面的使用寿命,增加了养护成本,还对交通安全构成潜在威胁。

为有效提升沥青路面的性能,满足日益增长的交通需求,众多聚合物材料被引入沥青改性研究中。聚氨酯作为一种具有独特化学结构和优异性能的高分子材料[5]-[15],近年来在沥青改性领域受到广泛关注。聚氨酯具有良好的弹性、粘结性和耐磨性,将其用于沥青改性,有望通过物理或化学作用,改变沥青的微观结构和宏观性能,从而有效解决沥青路面存在的上述问题。

尽管国内外学者针对聚氨酯改性沥青已开展了大量研究,并取得了一定成果,但目前仍存在诸多有待深入探究的方面。一方面,不同聚氨酯掺量对沥青性能的影响尚未得到全面、系统的揭示,尤其是高掺量情况下的性能变化规律尚不明确;另一方面,制备工艺对聚氨酯改性沥青性能的影响机制复杂,缺乏精准的量化分析;此外,在复杂环境条件下,聚氨酯改性沥青的长期性能演变规律也有待进一步明确。

基于此,本研究旨在全面、深入地剖析聚氨酯改性沥青的性能,系统研究不同聚氨酯掺量对沥青各项性能的影响规律,对比不同制备工艺下改性沥青的性能差异,并对其在复杂环境中的长期性能变化进行探究。通过本研究,期望为聚氨酯改性沥青在道路工程中的合理应用提供坚实的理论基础和可靠的数据支持,推动高性能道路材料的创新与发展,提升道路工程的质量和可持续性。

2. 实验材料及方法

2.1. 实验材料

本研究选用 70#基质沥青作为实验材料。该沥青的主要性能指标如下:在 25℃时,针入度为 69 (0.1 mm);在 10℃时,延度为 30 cm;软化点为 47.5℃。这些性能指标均符合道路工程中常用沥青的标准要求,为后续实验提供了稳定可靠的基础材料。

实验采用特定型号的聚氨酯改性剂,在 25℃的环境下,其粘度为 1160 mPa·s,密度为 1.10 g/cm³,拉伸强度达到 20.4 MPa,断裂伸长率为 330%。同时,搭配多元醇固化剂(CA-1)使用,以确保聚氨酯与沥青能够充分反应,实现对沥青性能的优化。

骨料选用玄武岩,不同粒径的玄武岩骨料具有不同的性能参数,具体如表 1 所示。玄武岩骨料良好的力学性能和表面特性,能够有效模拟实际工程应用场景,为研究聚氨酯改性沥青混合料的性能提供了

可靠的骨料材料。

Table 1. Basalt main index
表 1. 玄武岩主要指标

骨料粒径	表观相对密度	毛体积相对密度	吸水率(%)	有效相对密度(g/cm ³)
10~15 mm	2.858	2.800	0.72	2.820
5~10 mm	2.862	2.827	0.43	2.839
0~3 mm (矿粉)	3.008	2.636	1.17	2.940

2.2. 试验方法

2.2.1. 聚氨酯改性沥青的制备

分别制备聚氨酯掺量为 40%、50%、60%的热固性聚氨酯改性沥青，依次标记为 PUA-40、PUA-50、PUA-60。具体制备过程如下：首先，将基质沥青和聚氨酯分别预热至 120℃，使其具有良好的流动性；然后，按照设定的比例将聚氨酯加入到基质沥青中，在 120℃ 的温度条件下，以 4000 rpm 的转速进行高速剪切 10 min，确保聚氨酯能够均匀地分散在沥青中；接着，加入质量分数分别为 12%的 CA-1 和 6%的 CA-2 固化剂，继续进行 10 min 的剪切操作，从而使聚氨酯与沥青充分反应，完成聚氨酯改性沥青的制备。

2.2.2. 聚氨酯改性沥青混合料的制备

参考 SAC 和 SMA 两种在工程实践中性能表现优异的级配类型，制备多碎石聚氨酯沥青混凝土(SPC-13)和骨架密实型聚氨酯沥青混合料(SMP-13)。按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)中 T0716 方法的要求制备马歇尔试件，通过测定沥青混合料的毛体积密度、空隙率、矿料间隙率和饱和度等参数，确定不同沥青类型对应的最佳油石比。

在制备过程中，对比内混法和外混法两种不同的工艺。内混法是指在聚氨酯沥青制备过程中，将固化剂按比例直接加入到聚氨酯和沥青的混合物中；外混法是指在聚氨酯沥青混合料制备过程中，将固化剂喷洒加入。具体的混合料组成和制备工艺参数见表 2。

Table 2. Composition of the mixture and preparation process parameters
表 2. 混合料组成和制备工艺参数

混合料类型	结合料类型	级配类型	固化剂混合方式	最佳油石比
SMP-N	聚氨酯改性沥青	SMP-13	内混法 3.5%	5.8%
SMP-W	聚氨酯改性沥青	SMP-13	内混法 3.5% + 外混法 3.5%	-
SPC-N	聚氨酯改性沥青	SPC-13	内混法 3.5%	5.5%
SPC-W	聚氨酯改性沥青	SPC-13	内混法 3.5% + 外混法 3.5%	-
SAC	SBS 改性沥青	SAC-13	-	5.8%

2.2.3. 性能测试方法

(1) 高温性能测试：采用车辙试验评估沥青混合料的高温稳定性。车辙试验试件尺寸为 300 mm × 300 mm × 50 mm，按照 JTG E20-2011《公路工程沥青基沥青混合料试验规程》T0719 方法进行试验。试验轮为直径 200 mm、宽度 50 mm 的实心橡胶轮胎，轮压设定为 0.7 MPa，试验温度控制在 60℃，加载轮的运

行速度为 42 次/min。通过测量试件在反复高温荷载作用下的动态稳定性和车辙深度,来评价沥青混合料的高温稳定性。同时,使用动态剪切流变仪(DSR),在不同温度和频率条件下测试复数剪切模量(G^*)和相位角(δ),以此分析沥青的高温流变性能。

(2) 低温性能测试:通过低温小梁弯曲试验来评估沥青混合料的低温抗裂性。试验采用尺寸为 250 mm × 30 mm × 35 mm 的小梁试件,按照 JTG E20-2011《公路工程沥青基沥青混合料试验规程》T0715 方法进行,加载速率设定为 50 mm/min。通过测量低温加载下梁试件的抗弯拉强度、最大弯拉应变和弯曲模量,来评价沥青混合料的低温抗裂性能。利用弯曲梁流变仪(BBR),在低温环境下测量蠕变劲度模量(S)和蠕变速率(m),分析沥青的低温流变性能。

(3) 力学性能测试:进行拉伸试验,将沥青制成哑铃形试件,在万能材料试验机上进行拉伸测试,测量拉伸强度和伸长率,以评估沥青的拉伸性能。按照 JTG E20-2011《公路工程沥青基沥青混合料试验规程》T0709 方法进行马歇尔试验,制备试件并测量稳定度和流值,从而评估沥青混合料的抗压性能。采用直接剪切试验,使用特制模具装样,在剪切试验机上加加载,测量剪切强度,以此评估沥青的剪切性能。

(4) 耐久性能测试:采用薄膜烘箱试验(TFOT)和压力老化试验(PAV)模拟沥青的老化过程,对比老化前后沥青的性能变化,评估其耐老化性能。按照 JTG E20-2011《公路工程沥青基沥青混合料试验规程》T0729 方法进行冻融劈裂试验,测量冻融劈裂强度比,以此评估沥青混合料的耐水性能。将试件浸泡在酸、碱、盐溶液中,定期测量试件的性能变化,评估沥青的耐化学侵蚀性能。

3. 结果及分析

3.1. 高温性能

3.1.1. 高温稳定性

车辙试验结果(图 1)显示,聚氨酯改性沥青混合料的动稳定度远远高于 SBS 改性沥青混合料。以 PUA-50 改性的 SMP-N 混合料为例,其动稳定度达到 23,000 次/mm 以上,约为 SBS 改性 SAC 混合料动稳定度的 4.5 倍,同时车辙深度显著降低。这主要是因为聚氨酯与沥青发生反应后,形成了交联网络结构。这种结构增强了沥青胶浆对骨料的粘结力,使得骨料在高温荷载作用下的位移受到有效限制,从而提高了沥青混合料抵抗高温变形的能力,显著提升了高温稳定性。

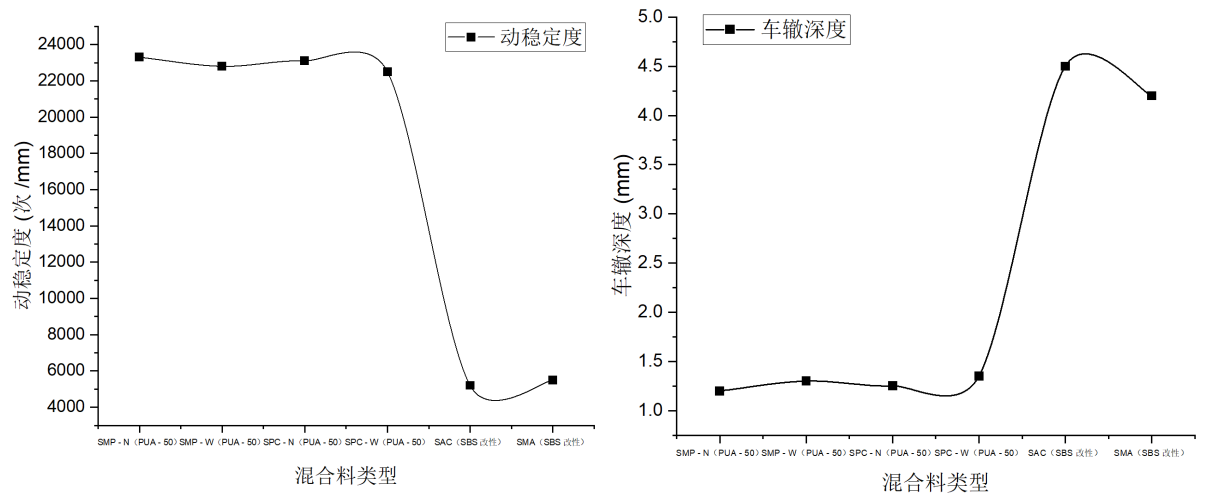


Figure 1. High temperature stability of different types of asphalt mixtures

图 1. 不同类型沥青混合料的高温稳定性

3.1.2. 高温流变性能

DSR 测试结果如图 2 所示,随着聚氨酯掺量的增加,复数剪切模量 G^* 逐渐增大,相位角 δ 逐渐减小。在 60°C 、 10 rad/s 的测试条件下,PUA-60 的 G^* 比基质沥青提高了约 3 倍, δ 降低了约 20° 。复数剪切模量 G^* 反映了材料在交变应力作用下抵抗变形的能力,其值越大,材料的抗变形能力越强;相位角 δ 则表示材料在变形过程中弹性和粘性的比例关系, δ 越小,材料的弹性成分越高,粘性成分越低。因此,上述测试结果意味着聚氨酯改性沥青在高温下的弹性增强,粘性减小,能够更好地承受交通荷载的作用,有效减少车辙病害的发生。

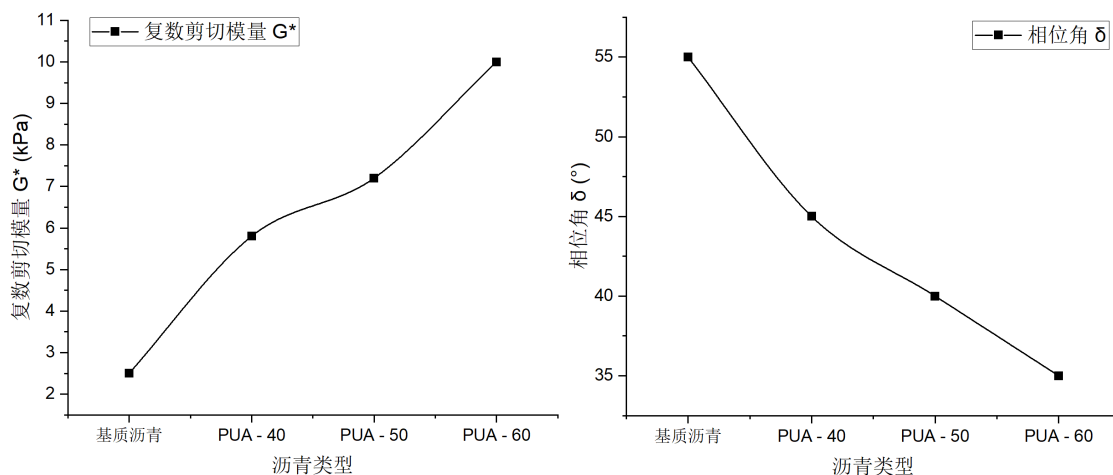


Figure 2. High temperature rheological properties of asphalt modified with different polyurethane contents
图 2. 不同聚氨酯掺量改性沥青高温流变性能

3.1.3. 高温抗车辙性能

为深入探究聚氨酯改性沥青在实际应用中的高温抗车辙性能,开展车辙实验。在实验中,专门制备了两组车辙试件,一组采用 PUA-50 改性沥青,另一组采用 SBS 改性沥青。模拟实际道路的高温重载环境,设定试验温度为 60°C ,轮压 0.7 MPa ,加载轮运行速度 42 次/min ,持续对试件进行加载,同时密切监测车辙深度的变化。

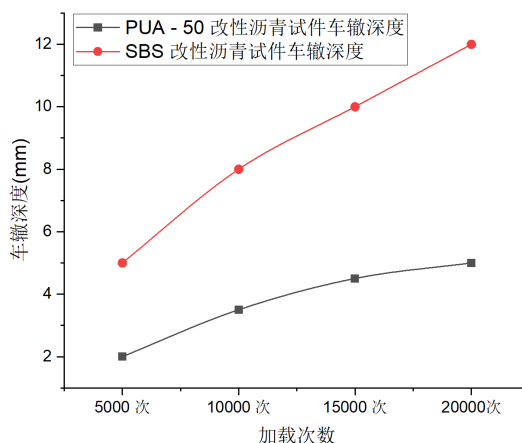


Figure 3. Rutting test results of different modified asphalt mixtures
图 3. 不同改性沥青混合料车辙实验结果

实验结果如图 3 显示,随着加载次数的增加,两组试件的车辙深度均呈现增长趋势。然而,PUA-50 改性沥青试件的车辙深度增长速度明显低于 SBS 改性沥青试件。当加载次数达到 20,000 次时,采用 PUA-50 改性沥青的试件,车辙深度仅为 5 mm;而采用 SBS 改性沥青的试件,车辙深度却达到了 12 mm。这一数据对比,清晰直观地展现出 PUA-50 改性沥青在抵抗车辙变形方面具有显著优势。

3.2. 低温性能

3.2.1. 低温抗裂性

低温小梁弯曲试验结果(图 4)显示,聚氨酯改性沥青混合料的抗弯拉强度和最大弯拉应变明显高于 SBS 改性沥青混合料。以 PUA-40 改性的 SPC-N 混合料为例,其抗弯拉强度达到 12 MPa 以上,最大弯拉应变超过 10,000 $\mu\epsilon$,分别为 SBS 改性 SMA 混合料的 1.6 倍和 3.5 倍。这表明聚氨酯改性沥青在低温环境下,能够承受更大的拉伸应力和变形,不易发生开裂现象。这主要是由于聚氨酯中的柔性链段和交联结构在低温时能够有效缓解沥青的收缩应力,提高了沥青的柔韧性和抗裂性能。

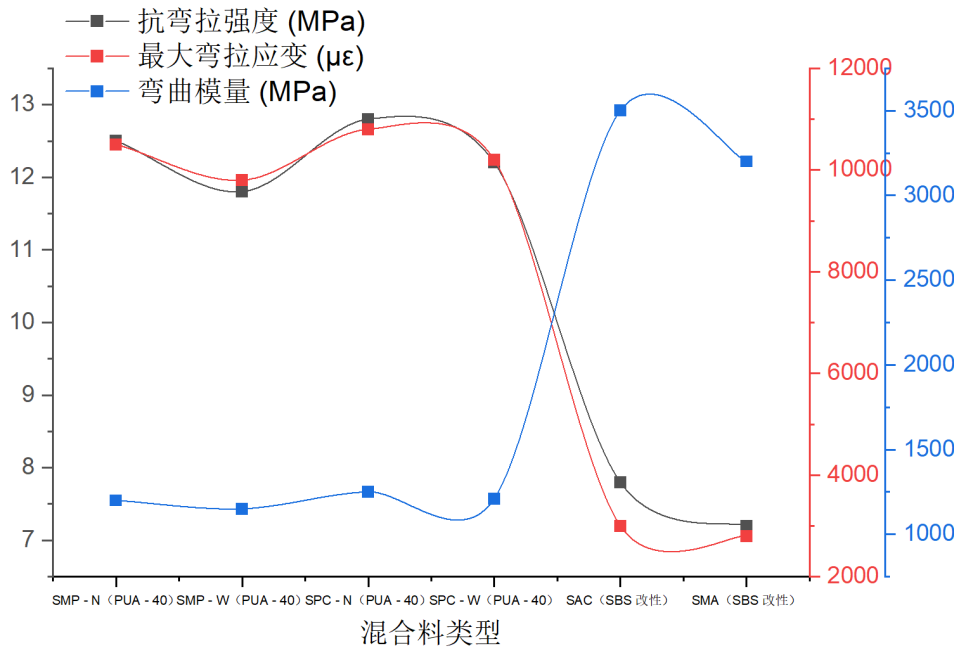


Figure 4. Low temperature trabecular bending test results of different modified asphalt mixtures
图 4. 不同改性沥青混合料低温小梁弯曲试验结果

3.2.2. 低温流变性能

弯曲梁流变仪测试结果如图 5 显示,聚氨酯改性沥青的蠕变劲度模量 S 随着聚氨酯掺量的增加而降低,蠕变速率 m 则增大。在 -12°C 时,PUA-50 的 S 比基质沥青降低了约 40%, m 提高了约 50%。蠕变劲度模量 S 反映了材料在低温下抵抗变形的能力, S 值越小,材料在低温下的变形能力越强;蠕变速率 m 则表示材料在低温下变形的速度, m 值越大,材料在低温下恢复变形的能力越强。因此,上述结果说明聚氨酯改性沥青在低温下的变形能力得到增强,能够更快地恢复变形,从而减少低温裂缝的产生。

3.3. 力学性能

3.3.1. 拉伸性能

拉伸试验结果如图 6 所示,聚氨酯改性沥青的拉伸强度和伸长率均显著提高。可以看出 PUA-50 拉

伸强度达到 8 MPa 以上, 伸长率超过 400%, 分别为基质沥青的 2.5 倍和 3 倍。这主要是由于聚氨酯与沥青发生化学反应, 形成了化学键和交联结构, 增强了分子间的作用力。在拉伸过程中, 这些化学键和交联结构能够有效抵抗外力, 使得沥青在受力时能够更好地承受拉伸变形, 从而提高了拉伸性能。

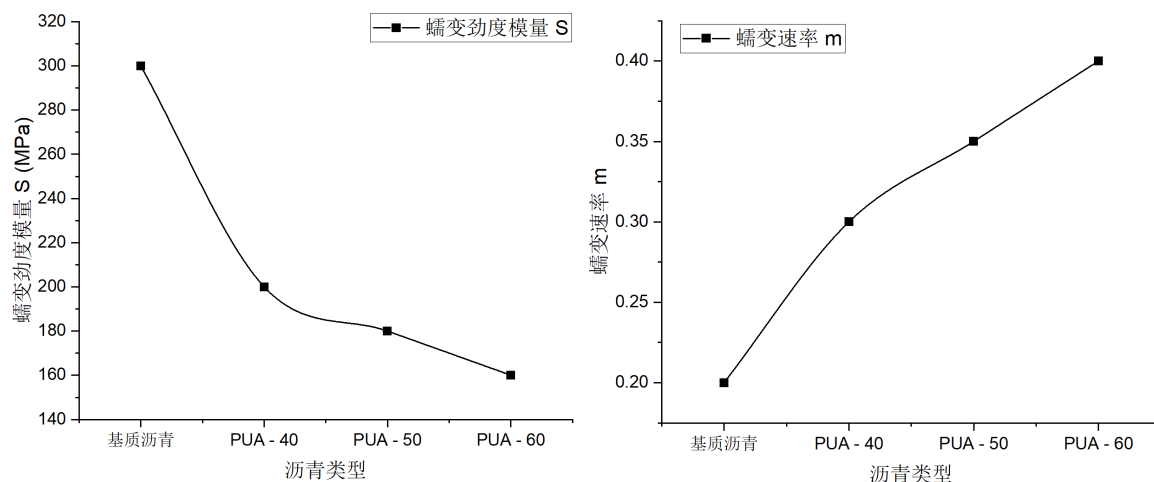


Figure 5. Rheological test results of modified asphalt bending beams with different polyurethane contents

图 5. 不同聚氨酯掺量改性沥青弯曲梁流变测试结果

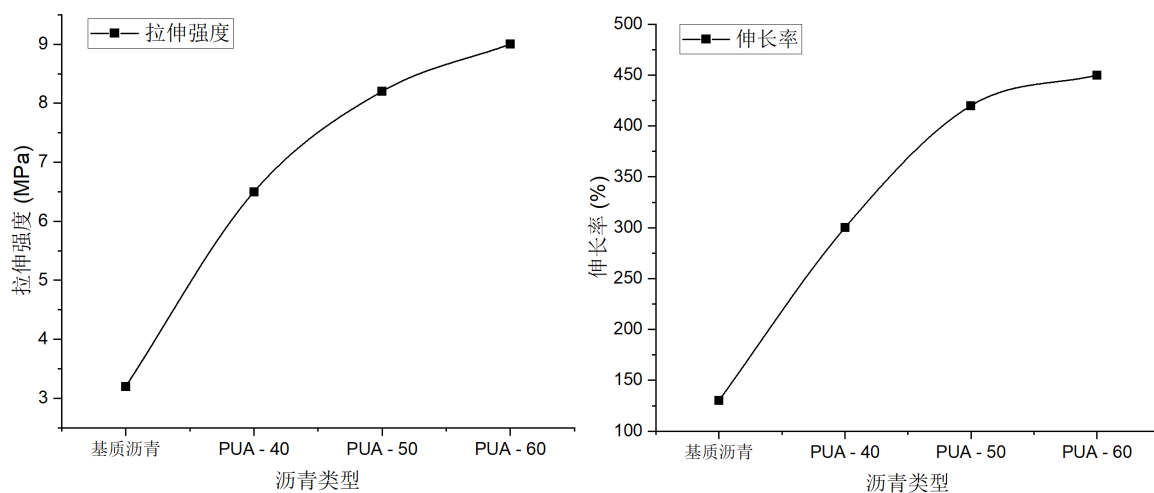


Figure 6. Tensile test results of modified asphalt with different polyurethane contents

图 6. 不同聚氨酯掺量改性沥青拉伸实验结果

3.3.2. 抗压性能

马歇尔试验是评估沥青混合料性能的重要手段之一, 其结果(图 7)清晰地展示出聚氨酯改性沥青混合料在性能上的显著提升, 尤其是稳定度方面表现突出。在本次试验中, 采用标准的马歇尔试验方法, 严格按照相关规范制备试件并进行测试。以 PUA-40 改性的 SMP-W 混合料为例, 其稳定度经测定达到 12 kN 以上。与之对比, SBS 改性 SAC 混合料的稳定度相对较低, PUA-40 改性的 SMP-W 混合料稳定度比 SBS 改性 SAC 混合料高出约 30%。

3.3.3. 剪切性能

图 8 显示了直接剪切试验结果, 可以看出聚氨酯改性沥青的剪切强度大幅提升。PUA-60 的剪切强度

比基质沥青提高了约 2 倍。聚氨酯形成的交联网络结构增强了沥青内部结构的整体性,使得沥青在受到剪切力作用时,能够更好地抵抗剪切变形。这种交联网络就像一张紧密的“网”,将沥青分子紧紧连接在一起,提高了沥青的抗剪切能力,保证了路面在车辆水平荷载作用下的稳定性。

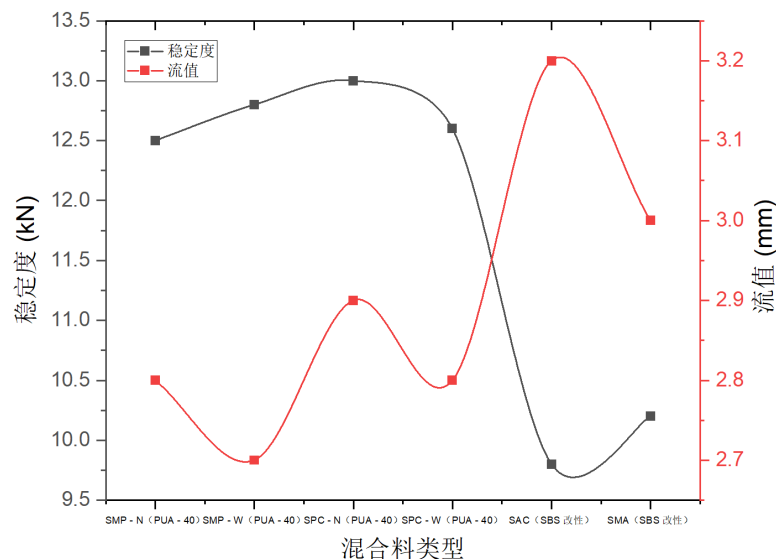


Figure 7. Marshall test number of different types of asphalt mixtures
图 7. 不同类型沥青混合料马歇尔试验

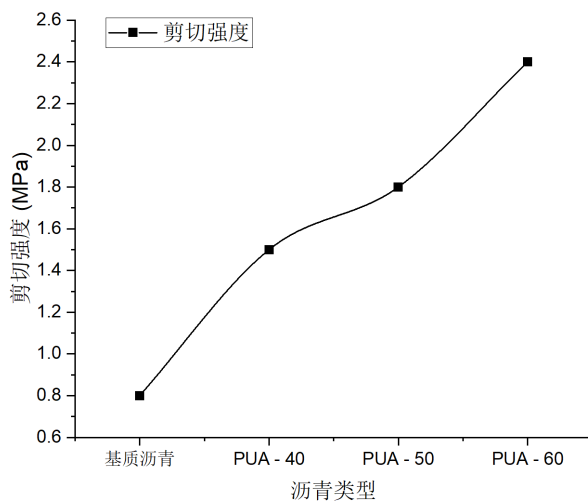


Figure 8. Direct shear test data of modified asphalt with different polyurethane contents
图 8. 不同聚氨酯掺量改性沥青直接剪切试验数据

3.4. 耐久性能

3.4.1. 耐老化性能

经过 TFOT 和 PAV 试验后(图 9),聚氨酯改性沥青的性能变化较小。老化后,PUA-50 的针入度比基质沥青高 10%以上,软化点变化幅度也较小。这是因为聚氨酯分子中的化学键和结构能够有效抵抗氧化和热降解。在老化过程中,聚氨酯的结构可以抑制沥青分子的氧化反应和交联反应,减少沥青性能的劣

化,从而延长了路面的使用寿命。

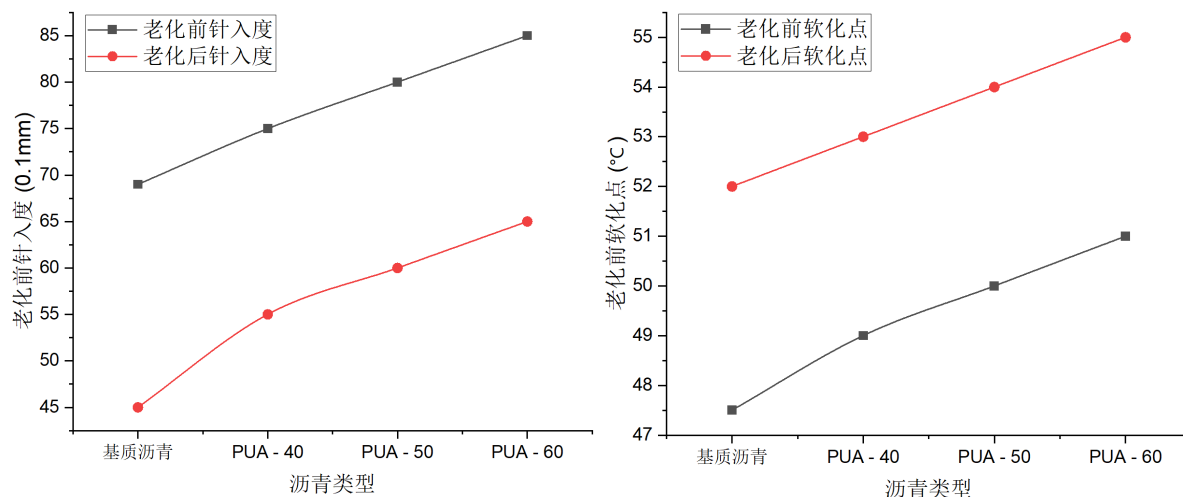


Figure 9. Experimental results of injection degree and softening point of modified asphalt with different polyurethane contents

图 9. 不同聚氨酯掺量改性沥青针入度和软化点试验结果

3.4.2. 耐水性能

冻融劈裂强度试验结果(图 10)表明,聚氨酯改性沥青混合料的冻融劈裂强度比在与 SBS 改性沥青混合料的对比中占据优势。具体来看,PUA-40 改性的 SPC-W 混合料表现尤为突出,其冻融劈裂强度比超过 80%。相比之下,SBS 改性 SMA 混合料的这一指标则相对较低,PUA-40 改性的 SPC-W 混合料比它高出约 15%。

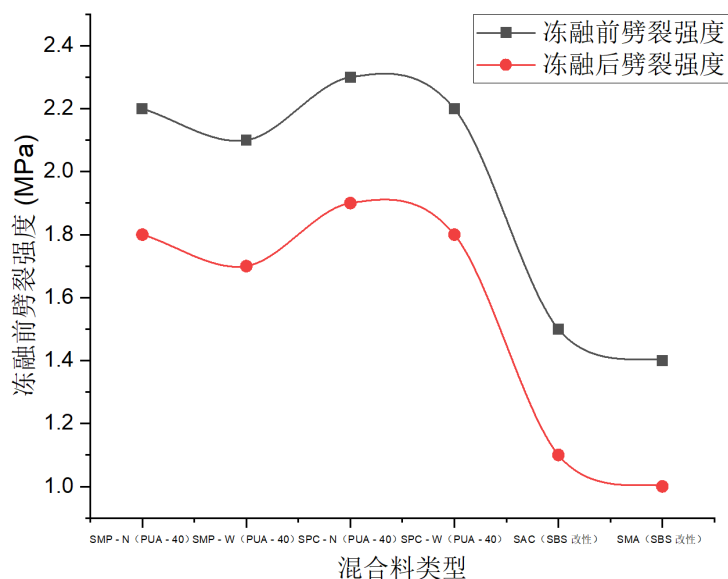


Figure 10. Results of freeze-thaw splitting test of different types of asphalt mixture

图 10. 不同类型沥青混合料冻融劈裂试验结果

3.4.3. 耐化学侵蚀性能

浸泡试验表明(图 11),聚氨酯改性沥青在酸、碱、盐溶液中性能稳定。在 5%盐酸溶液浸泡 30 天后,

PUA-60 的质量损失率比基质沥青低 30%以上。聚氨酯的化学结构使其具有良好的抗化学侵蚀性,它能够在沥青表面形成一层保护膜,阻挡化学物质对沥青的侵蚀。同时,聚氨酯与沥青形成的交联结构也起到了物理屏障的作用,减少化学物质向沥青内部的渗透,从而保护沥青的性能。

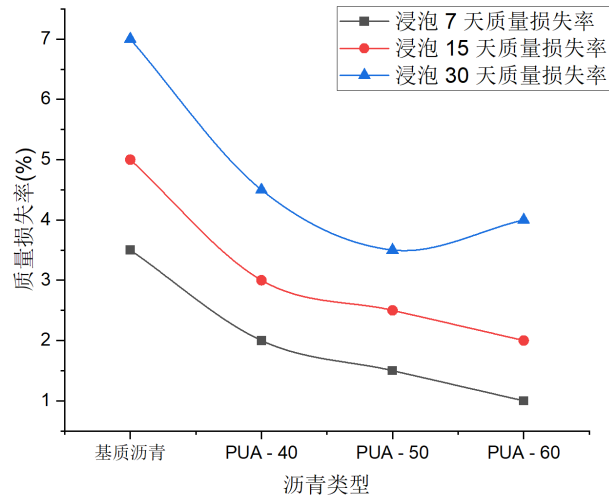


Figure 11. Experimental results of soaking modified asphalt with different polyurethane contents
图 11. 不同聚氨酯掺量改性沥青浸泡实验结果

4. 结语

本研究对聚氨酯改性沥青性能展开了全面且深入的探究,通过系统的实验研究与数据分析,揭示了聚氨酯改性沥青在不同条件下的性能表现,可得出以下结论:

- (1) 高温性能: 聚氨酯与沥青形成交联网络,增强粘结力,显著提升改性沥青混合料高温稳定性。车辙试验中,PUA-50 改性的 SMP-N 混合料动稳定度远超 SBS 改性 SAC;DSR 测试表明,PUA-60 在 60℃、10 rad/s 时,复数剪切模量 G^* 大幅提高,相位角 δ 显著降低;车辙实验显示,加载 20,000 次,PUA-50 试件车辙深度远低于 SBS 试件。
- (2) 低温性能: 聚氨酯的柔性链段和交联结构缓解沥青低温收缩应力。低温小梁弯曲试验中,PUA-40 改性的 SPC-N 混合料抗弯拉强度和最大弯拉应变大幅优于 SBS 改性 SMA;BBR 测试显示,PUA-50 在 -12℃ 时,蠕变劲度模量 S 降低,蠕变速率 m 提高,低温变形能力增强。
- (3) 力学性能: 聚氨酯与沥青形成化学键和交联结构,增强分子间力与结构整体性。拉伸试验中,PUA-50 拉伸强度和伸长率显著高于基质沥青;马歇尔试验中,PUA-40 改性的 SMP-W 混合料稳定度远超 SBS 改性 SAC;直接剪切试验中,PUA-60 剪切强度大幅高于基质沥青。
- (4) 耐久性能: 聚氨酯结构抵抗氧化、热降解、水及化学侵蚀。TFOT 和 PAV 后,PUA-50 老化后性能优于基质沥青;冻融劈裂试验中,PUA-40 改性的 SPC-W 混合料冻融劈裂强度比高于 SBS 改性 SMA;浸泡试验显示,PUA-60 在 5% 盐酸溶液中质量损失率低于基质沥青。

参考文献

[1] 冯鑫, 李小亚. 项目级高速公路沥青路面长期养护策略分析[J]. 北方交通, 2025(1): 49-52.
[2] 李晓龙. 基于全气候条件的多孔环氧沥青路面长期性能劣化特性研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
[3] 董福华, 游陈. 高速公路沥青路面病害成因及修复工艺控制研究[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,

2024(9): 26-29.

- [4] 王扣芹, 陈加干, 王海荣, 马军. 沥青路面典型剥落病害的成因分析及养护对策[J]. 运输经理世界, 2023(35): 130-132.
- [5] 李璐, 张贤明, 郝增恒. 动态二硫键自修复聚氨酯改性沥青的制备和性能[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(6): 514-519.
- [6] 代金洪, 赵毅, 王刚, 张智慧, 张新为. 生物基聚氨酯改性沥青研究进展[J]. 化工新型材料, 2024, 52(9): 222-227.
- [7] 孙银磊, 周凡莉, 李松, 丁雪松, 余川. 聚氨酯增韧环氧树脂改性沥青研究进展[J]. 应用化工, 2024, 53(11): 2711-2716.
- [8] 余川, 王璟, 李佳, 孙银磊. 聚氨酯预聚体改性沥青应用进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(11): 156-168.
- [9] 李明珠, 刘方韬, 肖飞, 陈玉清. 生物基水性聚氨酯改性乳化沥青的制备及性能研究[J]. 应用化工, 2024, 53(5): 1109-1112, 1118.
- [10] 金鑫, 李德利, 付昊轩, 杨野, 王凤池, 杨彦海, 张久鹏, 郭乃胜. 热塑性聚氨酯(TPU)改性沥青研究现状与发展趋势[J]. 材料导报, 2024, 38(202): 621-632.
- [11] 郭懿, 周泽昶, 杨礼明, 周乾. 聚氨酯环氧改性沥青制备及性能研究[J]. 公路, 2024, 69(1): 289-295.
- [12] 王鹏, 王杰, 兰勇, 马庆, 耿爽, 徐剑. 水性聚氨酯改性不黏轮乳化沥青制备及其路用性能研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2024, 51(6): 71-78.
- [13] 栾利强, 余和德, 文双寿, 任俊颖, 宋星君. 玄武岩纤维对聚氨酯改性沥青混合料水稳定性提升研究[J]. 化工新型材料, 2024, 52(5): 269-273.
- [14] 金鑫, 郭乃胜, 尤占平, 谭忆秋. 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.
- [15] 张雪丽, 孙伟清, 郑君华. 聚氨酯型固—固相变储能材料对沥青调温效果的影响研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(3): 841-843.