

聚氨酯改性沥青及混合料应用研究

李鑫¹, 董昭², 张金碑¹, 徐书东^{2*}, 武文鑫¹, 柳久伟²

¹山东高速交通建设集团有限公司, 山东 济南

²山东省交通科学研究院, 山东 济南

收稿日期: 2023年11月15日; 录用日期: 2023年12月12日; 发布日期: 2023年12月20日

摘要

为了评价聚氨酯改性沥青的技术优势, 对比评价了聚氨酯改性沥青与SBS沥青的技术指标, 研究表明聚氨酯改性沥青的软化点、储存稳定性及老化后的性能指标均优于SBS沥青, 但低温延度较差。基于车辙试验、弯曲蠕变试验、浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验评价了两种沥青混合料的路用性能, 研究表明聚氨酯改性沥青混合料能够在保证低温性能不发生衰减的情况下显著提升混合料的高温性能和水稳定性。进行了聚氨酯改性沥青混合料的工程应用, 可降低混合料施工温度10°C~20°C, 汉堡轮辙试验表明聚氨酯改性沥青混合料具有良好的抗车辙性能和抗水剥落能力, 应用效果良好。

关键词

聚氨酯改性沥青, 沥青混合料, 性能评价, 工程应用

Research on the Application of Polyurethane Modified Asphalt and Mixture

Xin Li¹, Zhao Dong², Jinbei Zhang¹, Shudong Xu^{2*}, Wenxin Wu¹, Jiuwei Liu²

¹Shandong Hi-Speed Transportation Construction Group Co. Ltd., Jinan Shandong

²Shandong Transportation Research Institute, Jinan Shandong

Received: Nov. 15th, 2023; accepted: Dec. 12th, 2023; published: Dec. 20th, 2023

Abstract

In order to evaluate the technical advantages of polyurethane modified asphalt, a comparative evaluation was conducted on the technical indicators of polyurethane modified asphalt and SBS asphalt. The study showed that the softening point, storage stability, and aging performance indicators of polyurethane modified asphalt were superior to SBS asphalt, but the low-temperature ductility was

*通讯作者。

poor. The road performance of two types of asphalt mixtures was evaluated based on rutting tests, bending creep tests, immersion Marshall tests, and freeze-thaw splitting tests. The study showed that polyurethane modified asphalt mixtures can significantly improve the high-temperature performance and water stability of the mixture while ensuring that low-temperature performance does not decay. The engineering application of polyurethane modified asphalt mixture has been carried out, which can reduce the construction temperature of the mixture by 10°C~20°C. The Hamburg wheel rutting test shows that polyurethane modified asphalt mixture has good resistance to rutting and water peeling, and the application effect is good.

Keywords

Polyurethane Modified Asphalt, Asphalt Mixture, Performance Evaluation, Application

Copyright © 2023 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. 前言

沥青路面是我国高等级路面的主要形式，然而随着我国道路交通量的不断增长，重载交通不断增多，沥青路面极易出现车辙、开裂、水损等早期病害[1] [2]，为了提升沥青路面的耐久性能，改性沥青被越来越多的用于道路工程中。目前主要使用的改性沥青包括 SBS 沥青、橡胶沥青、SBR 沥青等，其改性机理主要是通过剪切研磨作用将高分子聚合物溶于沥青，属于物理意义上的混溶，由于沥青与改性剂在分子量、密度、结构等性质方面差异，在共混时很难形成稳定的热力学体系，容易发生分层、离析等现象，影响改性沥青的储存稳定性和沥青路面的使用寿命[3] [4] [5]。聚氨酯作为目前应用最广泛的高分子聚合物之一，具有弹性好、强度高、耐高温、耐老化等优点，将聚氨酯用于沥青改性，可以在改性沥青体系中形成交联网状结构，改变沥青的结构和性能，赋予沥青高弹性和优良的力学强度，同时还有效地改善沥青与改性剂间的相容性、储存稳定性，有效提升道路品质，延长道路使用寿命[6] [7] [8] [9]。为了进一步评价聚氨酯改性沥青的技术优势，论文对比评价了聚氨酯改性沥青和 SBS 沥青的性能指标及混合料路用性能，并进行了聚氨酯改性沥青混合料的工程应用研究，为聚氨酯改性沥青技术的推广应用提供了必要的理论依据。

2. 聚氨酯改性沥青性能评价

2.1. 原材料

试验所用基质沥青为齐鲁 70#沥青，技术指标如表 1 所示。改性剂采用以异氰酸酯(-NCO)为活性反应基团的聚氨酯前驱体基反应型改性剂，其物理形态为深棕色低黏度液体，常温密度为 1.2 g/cm³。同时加入一定的 SBS 对聚氨酯沥青进行复合改性，作为聚氨酯改性辅助剂，能够与聚氨酯改性剂产生物理 - 化学反应，SBS 为线性改性剂，密度为 0.94 g/cm³。

2.2. 改性沥青制备工艺

SBS 改性沥青制备工艺：首先将基质沥青加热到 170°C，然后加入占沥青质量 4.5% 的 SBS 改性剂，采用高速剪切试验机先以 1500 r/min 的速率剪切 15 min，然后将转速调整到 5000 r/min 继续剪切 45 min，剪切过程保证沥青的温度控制在 165°C~175°C，最后将剪切完成的沥青置于 170°C 的烘箱中溶胀 60 min 获得 SBS 改性沥青。

Table 1. 70 # Asphalt Technical Indicators**表 1.** 70#沥青技术指标

检测项目	技术要求	试验结果	试验方法
针入度(25°C, 5 s, 100 g)/0.1 mm	60~80	68	T0604
延度(5 cm/min, 10°C, cm)	≥20	36	T0605
软化点(°C)	≥46	47.5	T0606
闪点(°C)	≥260	286	T0611
60°C动力黏度(Pa·s)	≥180	236	T0607
密度(25°C, g/cm ³)	实测记录	1.032	T0603
旋转薄膜 老化试验 (163°C, 85 min)	质量损失(%)	≤±1.0	-0.064
	针入度比(25°C, %)	≥61	70
	延度(10°C, cm)	≥6	8

聚氨酯改性沥青制备工艺: 首先将基质沥青加热到 170°C, 然后加入占沥青质量 1.5% 的 SBS 改性剂, 采用高速剪切试验机先以 1500 r/min 的速率剪切 15 min, 然后将转速调整到 5000 r/min 继续剪切 45 min 获得 SBS 改性沥青基体。将沥青温度降至 150 摄氏度, 采用搅拌机以 500 r/min 的速率对聚氨酯改性沥青进行搅拌发育, 边搅拌边加入占沥青质量 3% 的聚氨酯改性剂, 搅拌发育 90 min 获得聚氨酯改性沥青。

2.3. 聚氨酯改性沥青性能评价

依据《沥青及沥青混合料试验规程》[10] (JTG E20-2011) 分别对制备的 SBS 沥青和聚氨酯改性沥青的技术指标进行检测, 试验结果如表 2 所示。

Table 2. Technical indicators of modified asphalt**表 2.** 改性沥青技术指标

检测项目	SBS 沥青	聚氨酯沥青
针入度(25°C, 5 s, 100 g)/0.1 mm	49.4	43.5
延度(5 cm/min, 5°C, cm)	26.8	18.3
软化点(°C)	73.7	78.5
135°C运动黏度(Pa·s)	1.82	1.80
储存稳定性(离析, 48 h 软化点差)(°C)	2.1	0.2
旋转薄膜 老化试验 (163°C, 85 min)	质量损失(%)	-0.026
	针入度比(25°C, %)	72
	延度(5°C, cm)	16.3

研究发现相较于 SBS 沥青, 聚氨酯改性沥青的针入度更小, 软化点更高, 低温延度降低, 表明聚氨酯改性剂的加入使沥青变硬, 沥青的高温性能得到改善, 但聚氨酯改性沥青的低温性能较差。经老化作用后聚氨酯改性沥青的针入度比更高延度损失量更小, 表明聚氨酯改性沥青具有更好的抗老化性能, 可以有效避免沥青路面的疲劳破坏。综上所述表明聚氨酯改性沥青具有更好的抗高温变形性能和抗老化性能, 但其低温性能有所衰减。

3. 混合料配合比设计及性能评价

3.1. 级配设计

集料采用石灰岩，沥青分别采用上述自制聚氨酯改性沥青和 SBS 沥青进行混合料性能试验，对比评价聚氨酯改性沥青混合料的性能优势。根据原材料筛分结果进行混合料级配设计，级配类型为 AC-20 沥青混合料，混合料设计级配如表 3 所示，级配曲线图见图 1。

Table 3. Design grading of mixture

表 3. 混合料设计级配

级配名称	筛孔尺寸(mm)											
	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
确定级配	100	93.8	83.6	70.3	60.9	39.8	27.6	20.4	12.6	8.2	6.3	100
规范级配上限	100.0	100.0	92.0	80.0	72.0	56.0	44.0	33.0	24.0	17.0	13.0	7.0
规范级配下限	100.0	90.0	78.0	62.0	50.0	26.0	16.0	12.0	8.0	5.0	4.0	3.0
规范级配中值	100.0	95.0	85.0	71.0	61.0	41.0	30.0	22.5	16.0	11.0	8.5	5.0

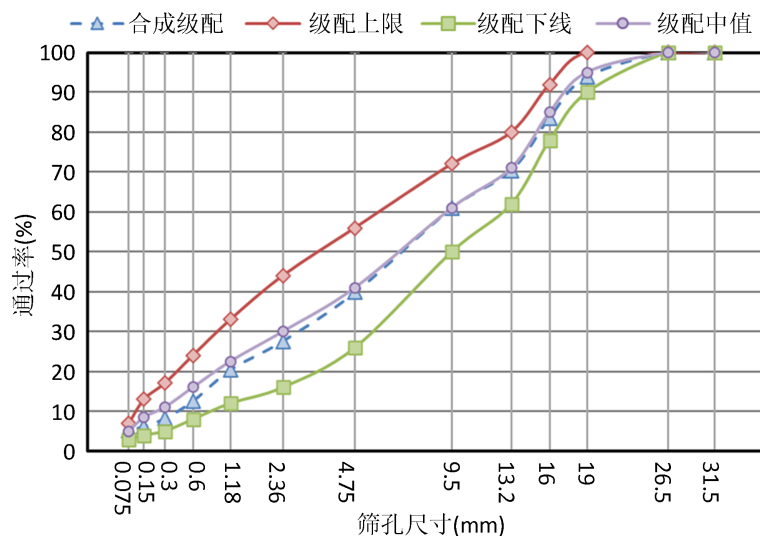


Figure 1. Grading curve of AC-20 mixture

图 1. AC-20 混合料级配曲线

3.2. 最佳沥青用量确定

基于马歇尔击实法进行混合料最佳沥青用量确定，混合料成型温度控制为 160℃，根据混合料体积指标采用图解法确定混合料最佳沥青用量为 4.4，试验结果图 2 所示。

3.3. 路用性能评价

沥青路面出现的车辙、开裂、坑槽等病害主要是混合料高温性能、低温性能和水稳定性不足的表现，为了尽量避免沥青路面出现上述病害，《沥青路面施工技术规范》[11] (JTGF40-2004)规定分别采用车辙试验、弯曲蠕变试验、浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验分别对混合料的路用性能进行评价，试验结果如图 3、图 4 所示。

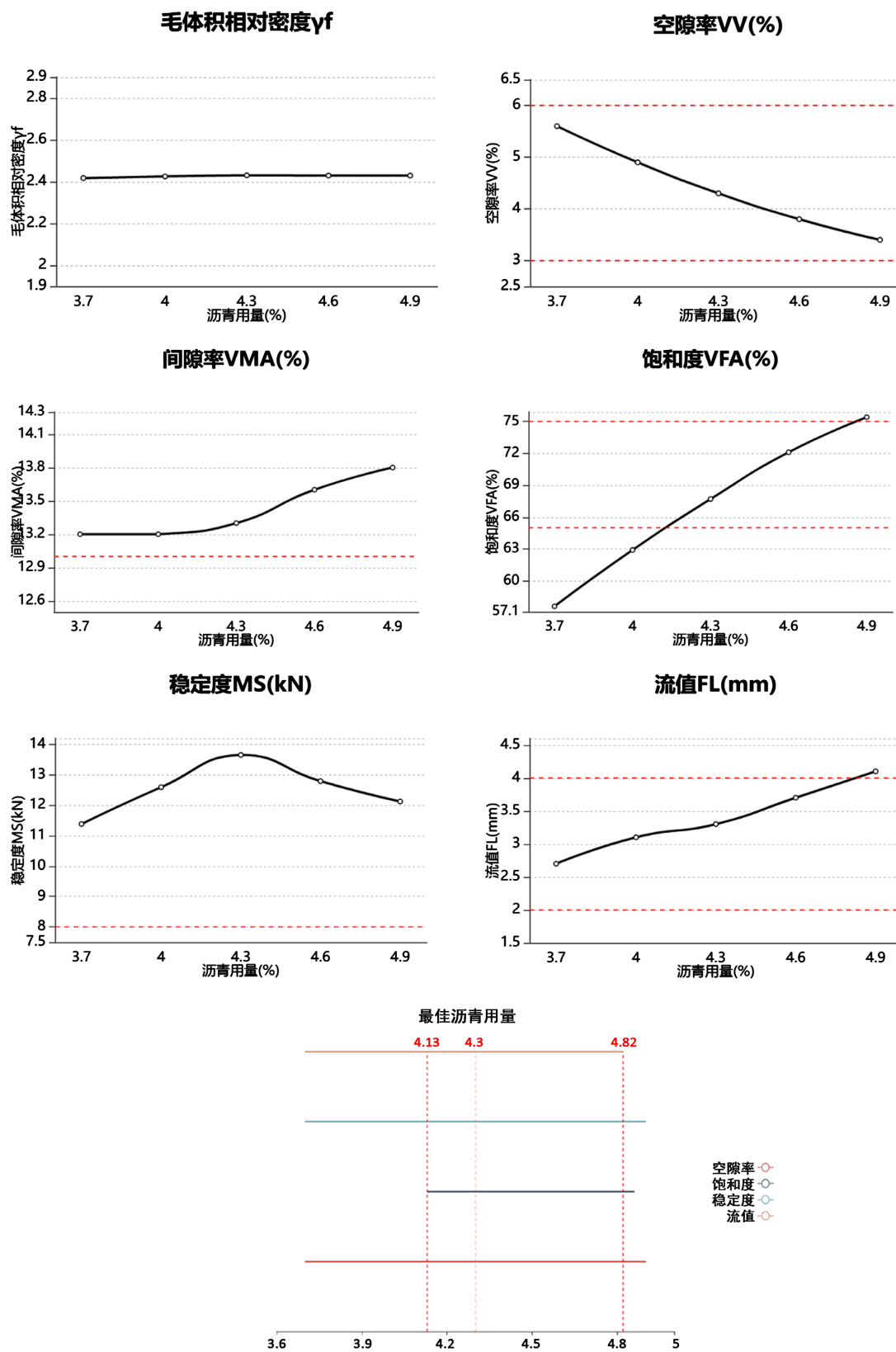


Figure 2. Analysis chart of optimal asphalt dosage for mixture
图 2. 混合料最佳沥青用量分析图

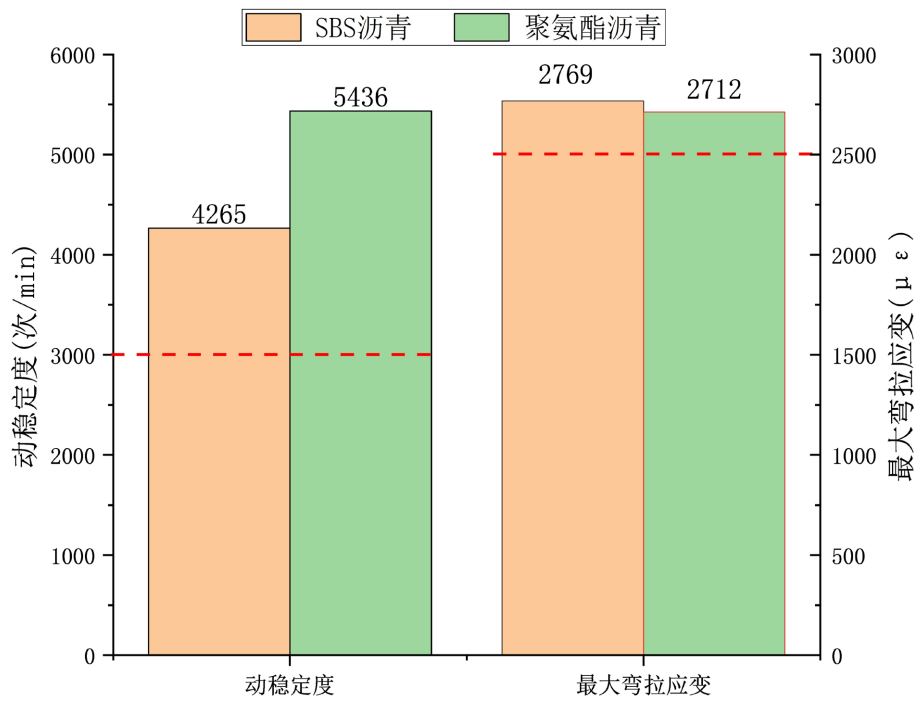


Figure 3. High and low temperature performance of the mixture

图 3. 混合料高、低温性能

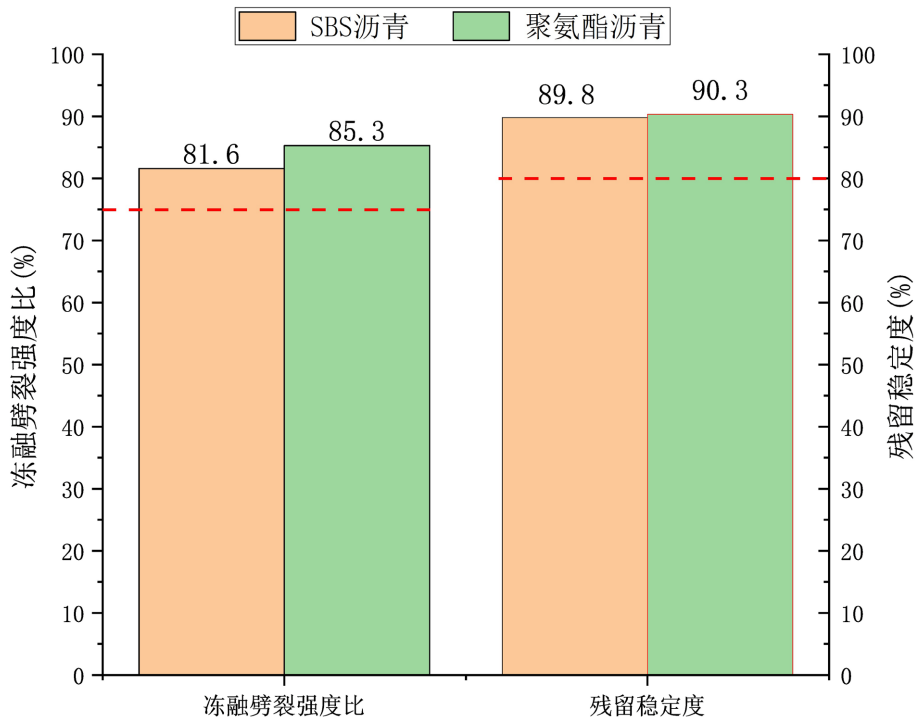


Figure 4. Water stability of mixture

图 4. 混合料水稳定性

研究发现聚氨酯改性沥青混合料的各项技术指标均满足《沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004)对改性沥青混合料的技术要求,表明聚氨酯改性沥青混合料具有良好的路用性能。相较于 SBS 沥青,聚

聚氨酯改性沥青混合料的动稳定性和冻融劈裂强度比显著提升,最大弯拉应变与 SBS 沥青相当,表明聚氨酯改性沥青混合料具有更好水稳定性和高温性能,可以有效避免沥青路面的车辙病害和水损害。分析原因主要是因为通过聚氨酯与 SBS 对沥青的复合改性作用,能够在沥青内部性能交联网络结构,增强了沥青与矿料间的黏附性,可以有效降低荷载作用下混合料的移动变形,同时避免动水压力下沥青膜从集料表面的剥落,提高了混合料的高温抗车辙性能和水稳定性。

4. 聚氨酯改性沥青混合料工程应用

基于 G18 荣乌高速养护工程进行聚氨酯改性沥青混合料的工程应用研究,由于聚氨酯改性沥青混合料良好的高温抗车辙性能,将其应用于路面的中面层,混合料类型为 AC-20,基于马歇尔击实法确定混合料的最佳沥青用量为 4.3。聚氨酯改性沥青混合料拌和采用间歇式拌和设备,混合料拌合时间控制为 50~60 s,其中干拌时间不低于 10 s,湿拌时间不低于 40 s,保证集料颗粒被沥青均匀裹覆,混合料无花白料、结团等现象发生。由于聚氨酯与沥青反应会产生发泡效果,具有一定的温拌作用,混合料施工温度相较于传统 SBS 沥青可降低 10℃~20℃。混合料初压采用双钢轮压路机紧跟摊铺机轻振 2 遍,复压选择胶轮压路机碾压 5~6 遍,保证混合料满足压实度要求,终压选择双钢轮压路机静压 2 遍进行收面,保证路面达到良好的平整度。

对完工后的路面进行钻芯取样、渗水试验,检测结果表明各项技术指标均满足《沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004)要求。试验结果如表 4 所示。

Table 4. On site inspection test results of polyurethane modified asphalt pavement
表 4. 聚氨酯改性沥青路面现场检测试验结果

检测点	1	2	3	4	5
毛体积密度(g/cm ³)	2.415	2.401	2.409	2.403	2.410
压实度(%)	99.5	98.9	99.2	99.0	99.3
空隙率(%)	4.8	5.4	5.0	5.3	5.0
渗水系数(ml/min)	68	80	75	90	70

为了综合评价聚氨酯改性沥青混合料的路用性能,在施工路段随机钻取代表性芯样进行汉堡车辙试验。汉堡车辙试验是目前测试沥青混合料抗水损害和抗车辙性能试验条件最苛刻的试验设备之一,试验结果与沥青混合料的现场性能具有良好的相关性,对混合料综合性能评价具有很好的可参考性[12] [13]。混合料汉堡轮辙试验结果如表 5 所示,轮辙曲线见图 5。

Table 5. Hamburg test results of polyurethane modified asphalt mixture
表 5. 聚氨酯改性沥青混合料汉堡试验结果

芯样	毛体积相对密度	轮辙深度(mm)				
		4000 次	8000 次	12,000 次	16,000 次	20,000 次
1#	2.416	2.9893	3.5703	3.8719	4.2847	4.4482
2#	2.404	2.6083	3.5370	3.9632	4.4387	4.6728

汉堡轮辙试验表明,在 50℃水浴条件下,经过 20,000 次碾压变形后,聚氨酯改性沥青混合料芯样轮辙深度均小于 5 mm,且混合料剥落曲线不存在剥落点,表明聚氨酯改性沥青混合料具有良好的抗车辙性能和抗水剥落能力,可以有效避免沥青路面的高温车辙和水损病害,具有良好的应用效果。

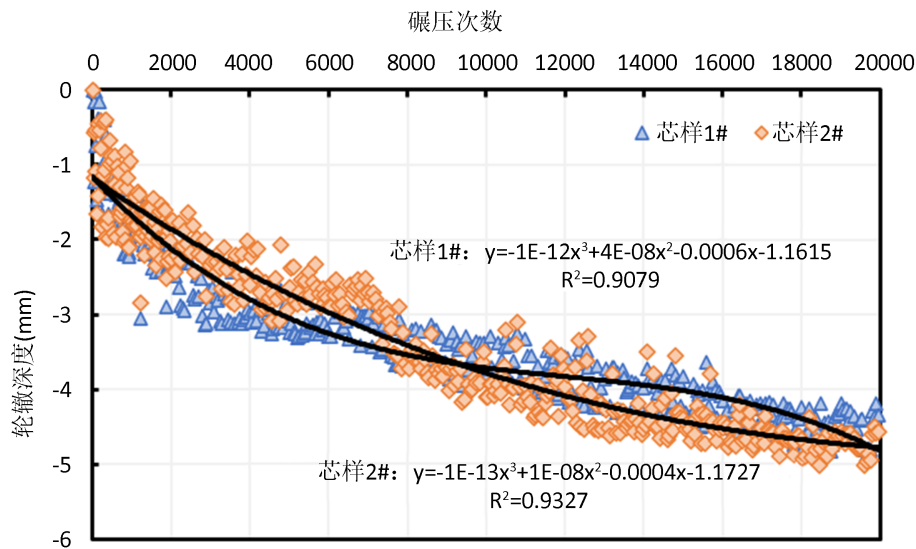


Figure 5. Hamburg wheel rut test deformation curve

图 5. 汉堡轮辙试验变形曲线

5. 总结

1) 提出了聚氨酯改性沥青的制备工艺, 相较于 SBS 沥青, 聚氨酯改性沥青的软化点、储存稳定性及老化后的性能指标得到改善, 但低温延度较差。

2) 聚氨酯改性沥青混合料在保证低温性能不发生衰减的情况下显著提升混合料的高温性能和水稳定性, 混合料各项技术指标均满足规范要求。

3) 聚氨酯改性沥青可降低混合料施工温度 $10^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$, 汉堡轮辙试验表明聚氨酯改性沥青混合料具有良好的抗车辙性能和抗水剥落能力, 应用效果良好。

参考文献

- [1] 张丽美. 公路沥青路面病害分析及养护[J]. 价值工程, 2022, 41(3): 75-77.
- [2] 张晨旭, 陈华鑫, 李毅, 等. 提升沥青路面抗水损害能力措施综述[J]. 材料导报: 纳米与新材料专辑, 2013, 27(2): 293-297.
- [3] 李杰, 甘新立, 唐晖, 等. 基于荧光显微图像分析的 SBS 改性沥青中改性剂掺量及均匀性分析[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2023, 47(1): 154-157.
- [4] 彭煜, 从艳丽, 杨克红, 等. 基于 DSR 试验方法检测 SBS 改性沥青热储存稳定性的影响因素研究[J]. 石油沥青, 2023, 37(4): 19-23.
- [5] 王枫成. 苯乙烯-丁二烯-苯乙烯共聚物改性沥青存储稳定性变化规律[J]. 弹性体, 2022, 32(4): 64-69.
- [6] 丁力. 聚氨酯前驱体/SBS 复合改性沥青及其混合料性能研究[J]. 市政技术, 2023, 41(3): 29-34.
- [7] 周岚, 张海涛. 聚氨酯改性沥青的流变特性及路用性能研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2022, 36(7): 142-147.
- [8] 李韬, 薛永兵, 刘振民, 等. 聚氨酯改性沥青的研究进展[J]. 当代化工, 2022, 51(4): 954-958.
- [9] 金鑫, 郭乃胜, 尤占平, 等. 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.
- [10] JTGE20-2011. 公路工程沥青及沥青混合料试验工程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [11] 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.
- [12] 胡晓宇, 单建飞, 姜正晖. 基于浸水汉堡车辙试验的沥青路面水损坏性能评价[J]. 公路工程, 2022, 47(3): 125-130.
- [13] 张争奇, 罗要飞, 张苛. 沥青混合料汉堡车辙试验评价研究综述? [J]. 材料导报, 2017, 31(3): 96-105.