

基于复合改性的沥青路面耐久性与抗车辙性能研究

李辉¹, 丁婷婷², 刘胜杰³, 韩海龙¹, 吕天宇⁴, 张永强¹, 孙建秀², 田野⁴, 刘伟⁴, 吕鑫⁵

¹山东高速集团有限公司滨州分公司, 山东 滨州

²山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东 济南

³郑州工业应用技术学院, 河南 郑州

⁴山东省高速养护集团有限公司, 山东 济南

⁵山东大学, 山东 济南

收稿日期: 2021年11月27日; 录用日期: 2021年12月11日; 发布日期: 2021年12月28日

摘要

为有效减轻车辙病害对沥青路面服役性能的影响, 本文采用高分散橡胶粉和再生PE进行沥青混合料的复合改性, 经过两组不同配比的研究, 最终确定添加15%橡胶粉 + 0.3%再生PE的沥青混合料的综合性能优异, 其高温抗车辙能力明显优于SBS沥青混合料, 同时低温稳定性和水稳定性较普通沥青混合料显著提升。通过基于温度 - 轴载的路面车辙预估模型计算和实验路铺筑验证, 表明中面层采用复合改性沥青混合料, 其车辙量大幅减小, 具有良好的抗车辙性能, 同时实现了固体废弃物资源化, 经济与环境效益显著。

关键词

沥青路面, 废弃物资源化, 复合改性, 车辙预估模型, 高温抗车辙性能

Research on Durability and Anti-Rutting Performance of Asphalt Pavement Based on Compound Modification

Hui Li¹, Tingting Ding², Shengjie Liu³, Hailong Han¹, Tianyu Lyu⁴, Yongqiang Zhang¹, Jianxiu Sun², Ye Tian⁴, Wei Liu⁴, Xin Lyu⁵

¹Binzhou Branch of Shandong Hi-SPEED Group Co., Ltd., Binzhou Guangdong

²Shandong Province Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan Shandong

³Zhengzhou Institute of Industrial Application Technology, Zhengzhou Henan

⁴Shandong Hi-SPEED Maintenance Group Co., Ltd., Jinan Shandong

文章引用: 李辉, 丁婷婷, 刘胜杰, 韩海龙, 吕天宇, 张永强, 孙建秀, 田野, 刘伟, 吕鑫. 基于复合改性的沥青路面耐久性与抗车辙性能研究[J]. 土木工程, 2021, 10(12): 1272-1280. DOI: 10.12677/hjce.2021.1012140

⁵Shandong University, Jinan Shandong

Received: Nov. 27th, 2021; accepted: Dec. 11th, 2021; published: Dec. 28th, 2021

Abstract

In order to effectively reduce the influence of the transaction performance of asphalt pavement disease, this paper uses high-dispersed rubber powder and regenerated PE for the composite modification of asphalt mixing materials. After two sets of different ratios, it is finally determined to add 15% rubber powder + 0.3%. The overall performance of the asphalt mixture of the regeneration PE is excellent, the high temperature anti-rutting performance can be significantly better than the SBS asphalt mixture, and the low temperature stability and water stability are significantly improved than those of ordinary asphalt mixtures. By temperature-axial road rutting estimation model calculation and experimental road feature verification, when the medium-sided layer uses a composite modified asphalt mixture, the number of cars has a large decrease, with a good anti-rutting performance, while achieving recycling solid waste and having remarkable economic and environmental efficiency.

Keywords

Asphalt Pavement, Recycling Solid Waste, Composite Modification, Rutting Estimation Model, High Temperature Anti-Rutting Performance

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

高速公路通常采用沥青作为面层材料,但在温度、空气、紫外线等自然因素和外界载荷的综合作用下[1],导致沥青材料发生老化,情况严重时会产生车辙等病害,降低了沥青路面的服役性能。

为解决沥青路面的车辙病害,国内外学者对沥青混合料进行了大量的研究。目前常采用对沥青进行改性的措施,但是单一改性常注重改善某一性能指标,对沥青混合料的综合性能考虑不足,因此越来越多的学者开始研究复合改性工艺,通过几种改性剂的综合使用来改善沥青混合料的综合性能。但相关研究仍停留在室内试验测试,对复合改性的改性机理、改善效果评价研究不足。

目前市场上常见的抗车辙剂可分为三类,第一种主要原料为各种密度的塑料,同时添加一些改性剂;第二种主要原料为天然岩沥青,同时添加部分 SBS 及其他塑料改性剂,与沥青的相容性稍好;第三种以硫磺为主要成分,同时添加部分塑料改性剂。本课题拟采用高性能再生 PE、高分散橡胶粉作为主要原料,研发高低温性能良好、成本可控的沥青路面抗车辙材料。

2. 复合改性抗车辙混合料

本文首先制备了两种改性剂,进行不同掺量组合的配比设计,进而研制了多种复合改性沥青混合料,同时进行相应的室内试验研究其改性机理和改性效果,进而研发性能稳定、高低温性能良好、成本可控的沥青路面抗车辙材料。

2.1. 复合改性材料

本文选用废旧橡胶粉作为沥青改性剂 A。废旧橡胶粉可显著增强沥青的弹性恢复性能,但难以改善其高温性能[2]。在研究中将废旧轮胎切割成碎片,然后经过磨削得到粒径 0.4~0.6 mm 的橡胶粉颗粒,如图 1(a)所示,其物理化学组成详见表 1。

选用废旧塑料制备的再生 PE 为沥青改性剂 B,其可改善沥青混合料的高温性能,但会导致沥青的脆性增强,削弱沥青混合料的低温抗裂性[3]。研究中将废旧塑料经过预处理后,经挤出得到粒径为 2~3 mm 的再生聚乙烯颗粒,再添加少量其他物质,经过二次造粒得到沥青改性剂 B,如图 1(b)所示;其物理性能试验结果见表 2。



Figure 1. Two additives. (a) Waste rubber; (b) Waste plastics
图 1. 两种添加剂。(a) 废旧橡胶; (b) 废旧塑料

Table 1. Physical chemistry composition of modifier A (%)

表 1. 改性剂 A 的物理化学组成(%)

橡胶烃	炭黑	灰分	丙酮抽出物	水分	纤维
59.00	33.65	6.04	4.22	0.21	<1.00

Table 2. Physical properties test results of modifier B

表 2. 改性剂 B 物理性能试验结果

指标	技术要求	试验方法	测试值	单位
外观	颗粒状, 均匀、饱满、无结块	/	满足要求	/
单个颗粒质量	≤0.03	JT/T860.1	0.023	g
密度	≤1.0	GB/T 1033	0.946	g/cm ³
熔融指数	≥1.0	GB/T 3682	1.3	g/10min
灰分含量	≤5	JTG E20	3.3	%

2.2. 试验分析

本文共制备了四种沥青混合料,详细方案见表 3 所示。其中鉴于再生 PE 在沥青中难以分散的特点,在沥青混合料制备过程中考虑将其直接与集料预拌,再加入橡胶粉改性沥青制备混合料。

Table 3. Mixed material ratio**表 3.** 混合料配比方案

组合名称	改性剂 A (与基质沥青质量比)	改性剂 B (与集料质量比)
11A + 0.25B	11%	0.25%
15A + 0.3B	15%	0.3%
基质沥青	/	/
SBS	/	/

橡胶沥青实验室制备方法：先将一定量的 70 号基质沥青倒入不锈钢容器加热至 135℃，再将一定量废旧胶粉加入熔融的沥青中搅拌均匀并放入烘箱中 160℃保温 30 min。将保温后的沥青用电炉加热至 180℃~190℃后加入高分散性橡胶粉，通过搅拌机进行简单搅拌，制备出所需的橡胶沥青备用。

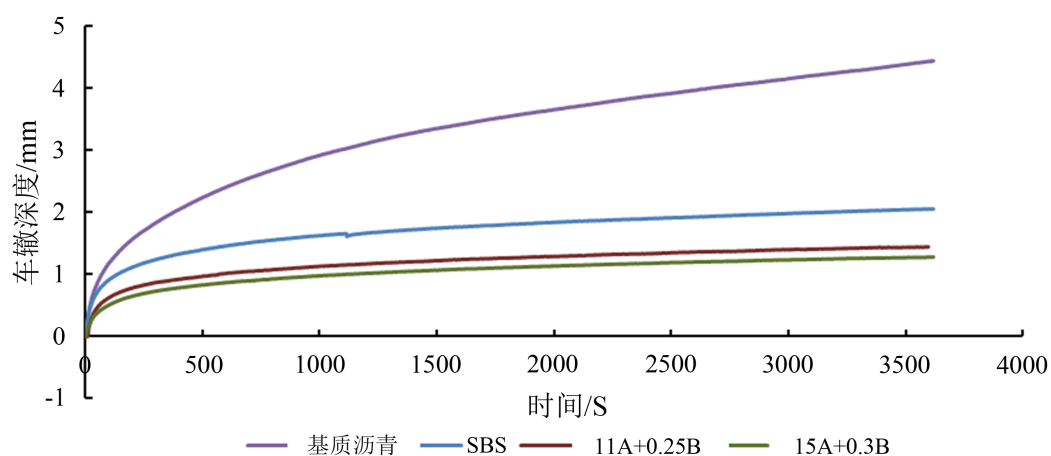
沥青混合料实验室制备方法：集料在 185℃~190℃条件下加热 4 小时，加入 190℃拌和锅干拌 30 秒，添加再生 PE 干拌 15 秒，加入 160℃~165℃橡胶改性沥青拌和 60 秒，最后加矿粉拌和 30 秒。击实温度确定为 160℃~165℃。

对制备的沥青混合料进行相关性能试验，对比分析其高低温及水稳定性。

1) 动稳定度

采用车辙试验测试沥青混合料在高温条件下每产生 1 mm 变形时所承受标准轴载的行走次数[4]。本文测试了 11A + 0.25B 和 15A + 0.3B 两组复合抗车辙改性沥青混合料、基质沥青和 SBS 混合料的马歇尔试件在 60℃条件下的动稳定度，评价沥青混合料高温稳定性。

将四种沥青混合料的车辙深度随时间变化绘制为曲线，如图 2 所示。加载 3600 s 后，两种复合改性沥青混合料的车辙深度较基质沥青和 SBS 沥青混合料均明显减小，表明复合改性后混合料的高温稳定性优异。

**Figure 2.** Curve of the depth of four asphalt mixture vehicles**图 2.** 四种沥青混合料车辙深度随时间变化曲线

参照规范中的动稳定度计算公式，可以计算得到四种沥青混合料的动稳定度，如表 4 所示。可以看出 15A + 0.3B 组合的动稳定度为 9131 次/mm，约为 SBS 的两倍，基质沥青混合料的 6 倍，表明沥青混合料在复合改性后其高温抗变形能力大幅提升。这是由于废旧塑料在与集料拌和过程中遇热融化拉丝，使集料胶结更加紧密，永久变形量小，有效提升混合料的高温抗车辙性能。

Table 4. Four asphalt mixture stability
表 4. 四种沥青混合料动稳定度

组合名称	动稳定度(次/mm)
11A + 0.25B	8740
15A + 0.3B	9131
基质沥青	1526
SBS	5526

2) 弯曲破坏应变

在 -10°C 低温条件下,采用万能试验机测试 11A + 0.25B 和 15A + 0.3B 两组复合改性沥青混合料和基质沥青、SBS 沥青混合料的最大弯拉应变,进行对比分析,评价其低温性能。

表 5 为四种沥青混合料弯曲破坏应变,可以发现 11A + 0.25B 和 15A + 0.3B 两种组合比 SBS 沥青混合料的值稍小,但均明显优于基质沥青混合料,这说明改性剂 A 橡胶粉的低温性能补偿作用明显,可以提高沥青混合料的低温抗裂性。

Table 5. Four asphalt mixes bending damage strain ($\mu\epsilon$)
表 5. 四种沥青混合料弯曲破坏应变($\mu\epsilon$)

组合名称	弯曲破坏应变($\mu\epsilon$)
11A + 0.25B	2568
15A + 0.3B	3046
基质沥青	2015
SBS	3685

3) 浸水残留稳定度

采用马歇尔浸水残留稳定度试验测试 11A + 0.25B、15A + 0.3B、基质沥青、SBS 沥青四种混合料的浸水残留稳定度,评价混合料进行复合改性后的水稳定性。

表 6 为四种沥青混合料的浸水残留稳定度,可以看出 11A + 0.25B 和 15A + 0.3B 两组混合料的浸水残留稳定度分别为 92.3%和 92.7%,基本接近 SBS 沥青混合料的 93%,说明复合改性混合料的水稳定性比基质沥青优异,与 SBS 沥青混合料相当。这是由于废旧塑料与橡胶沥青共同作用使得与集料的粘附性增强,故水稳定性增加[5]。

Table 6. Four asphalt mixture immersed water stability
表 6. 四种沥青混合料浸水残留稳定度

组合名称	浸水残留稳定度%
11A + 0.25B	92.3
15A + 0.3B	92.7
基质沥青	90.8
SBS	93

综上可以发现采用本文所研发的复合改性工艺后,沥青混合料的高温稳定性改善显著,并且其低温

性能及水稳定性也均较基质沥青有所提升,表明废旧胶粉起到了低温性能补偿的作用,复合改性效果较优。并且对比 11A + 0.25B 和 15A + 0.3B 两组的综合指标,最终推荐 15A + 0.3B 复合改性组合。

3. 抗车辙性能评价

根据前期研究,高速公路的车辙病害常发生于中面层。故本文在研究中将复合改性抗车辙沥青混合料用作中面层,采用模型预测和实验路实测的两种方式对路面的抗车辙性能进行评价。

3.1. 基于温度 - 轴载的车辙预估

通过 ABAQUS 有限元软件将路面温度场与真实交通量通过二次开发进行耦合,利用时间硬化蠕变模型,基于温度场和轴载数据对改性前后沥青混合料用于中面层后进行车辙预估。

1) 外界参数及路面材料参数获取

外界参数包括温度参数和交通量参数,本研究首先获取了试验路位置 1~12 月典型日代表性温度数据,以此为基础模拟路面结构内部的温度场。同时从高速收费站获取往年的实测轴载数据,将每个月的数据归一化到典型日的各小时内,可换算得到标准轴载作用次数如图 3 所示。

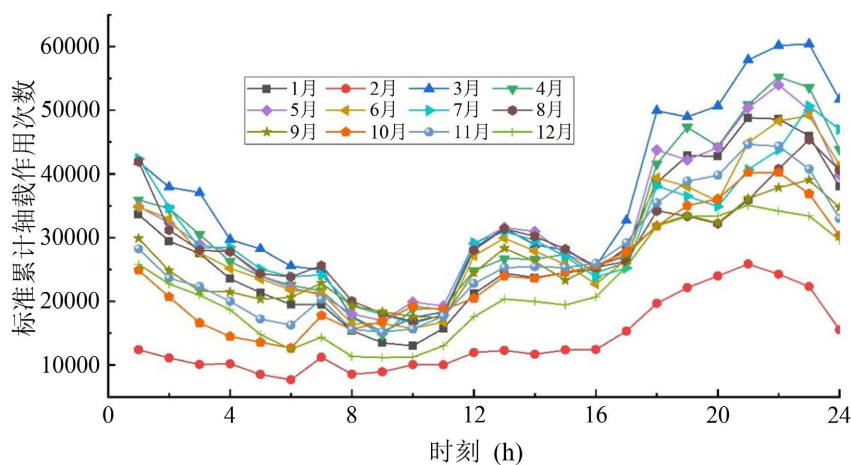


Figure 3. Transport variation in January to December

图 3. 1~12 月交通量变化图

路面材料参数中的蠕变参数采用单轴蠕变试验确定[6]。在研究中对基质沥青 AC-20 混合料和复合改性沥青 AC-20 混合料分别进行 20°C~60°C (间隔 10°C) 条件下的单轴静态蠕变试验,获取各温度下的蠕变参数,结果如表 7 所示。

Table 7. Creep parameters of asphalt mixing materials

表 7. 沥青混合料的蠕变参数

材料	A	n	m	温度(°C)
基质沥青 AC-20	4.58E-11	0.944	-0.596	20
	2.461E-10	0.796	-0.585	30
	1.341E-07	0.611	-0.728	40
	8.354E-06	0.368	-0.547	50
	1.67E-05	0.304	-0.467	60

Continued

	4.58E-11	0.944	-0.596	20
	2.46E-10	0.796	-0.585	30
复合改性沥青 AC-20	1.204E-09	0.866	-0.665	40
	1.250E-07	0.592	-0.597	50
	2.499E-06	0.319	-0.530	60

2) 基于温度 - 轴载的车辙模型

首先基于 1~12 月的外界环境参数, 模拟路面内部的温度场情况, 结合时间硬化蠕变模型, 将温度场与轴载耦合, 建立基于温度 - 轴载的车辙模型(图 4)。

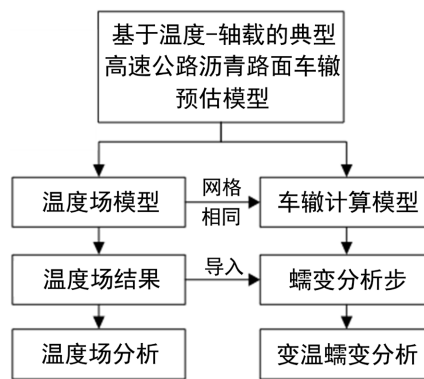


Figure 4. Rutting model based on temperature field-shaft loading
图 4. 基于温度场 - 轴载的车辙模型

3) 预估车辙量分析

利用上述车辙模型, 计算了不同月份的路面车辙情况, 其中 11~4 月的车辙量占比约为 0.1%, 在后续分析将 5~10 月的车辙量作为年车辙量。提取每月的上中下三层的车辙量绘制为柱状堆积图, 见图 5 所示。可以看出每个月中面层的车辙量占比最大, 说明车辙主要发生在中面层, 与前人研究相符合。

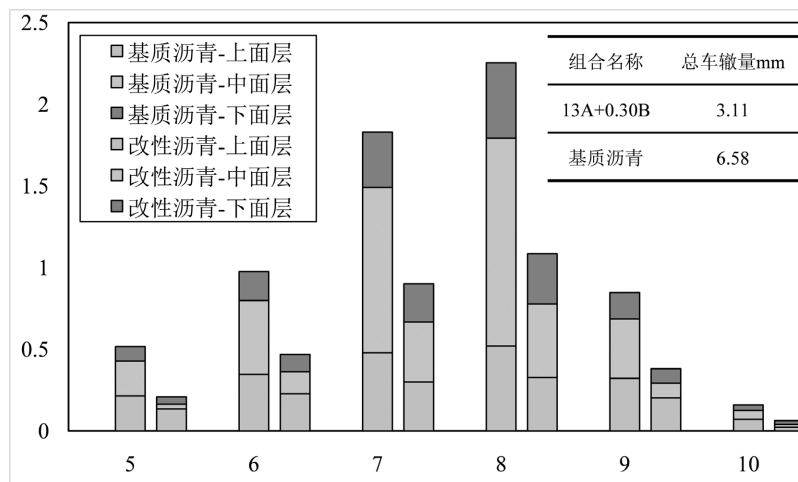


Figure 5. Changes in ruts from May to October
图 5. 5~10 月的车辙量

同时中面层采用复合改性沥青混合料后, 5~10 月份的车辙量较普通混合料明显减小, 其总车辙量约为基质沥青混合料的一半, 说明复合改性混合料的抗车辙性能得到明显提升, 复合改性的效果明显。

3.2. 实验路验证

依托山东省泰新高速公路养护项目, 进行抗车辙沥青混合料试验段铺筑。该路段养护方案为铣刨沥青层, 并回填 4 cm SMA-13、6 cm AC-20、8 cm AC-25 的面层材料, 具体路面结构如图 6 所示。同实验路段的中面层采用复合改性抗车辙沥青混合料, 与普通沥青混合料进行对比验证。

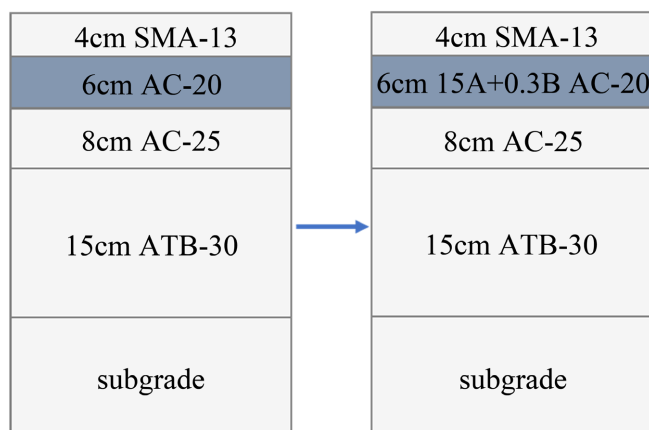


Figure 6. Comparative comparison of common road sections and test sections
图 6. 普通路段与试验段路面结构对比

经过一年的温度及交通荷载的综合作用后, 对试验路段进行了车辙量检测, 发现使用复合改性抗车辙沥青混合料作为中面层的路段未出现明显车辙, 测量值仅为 3~4 mm, 而普通沥青混合料做中面层的路段车辙为 6~8 mm, 表明复合改性沥青混合料作为中面层具有优秀的路用性能。

3.3. 车辙预估值与试验段实测值对比

车辙预估值与试验段车辙实测值如表 8 所示, 二者的结果都表明采用复合改性抗车辙沥青混合料作为中面层可有效减小路面车辙量, 保证路面优异的路用性能。同时可以发现二者数据吻合程度较好, 验证了基于温度 - 轴载的车辙模型的可靠性, 表明其可模拟路面车辙的真实发展情况。

Table 8. Comparison of rutting estimates and test segments
表 8. 车辙预估值与试验段车辙观测值对比

中面层材料	车辙预估值	试验段车辙测量值
基质沥青 AC-20C	6.58 mm	7.2 mm
复合改性沥青 AC-20C	3.11 mm	3.5 mm

4. 结论

本文采用改性剂 A (高分散橡胶粉)和改性剂 B (再生 PE)作为复合改性材料, 制备的沥青混合料高温性能良好、成本低廉。依托所建立的车辙预估模型和实体工程, 验证了复合改性沥青混合料作为中面层具有优秀的工程效果。主要研究结论如下:

- 1) 本文的复合抗车辙改性工艺可大幅提高沥青混合料的高温性能, 超过 SBS 改性沥青混合料; 低温

性能较基质沥青混合料有较大改善, 抗水损害能力与 SBS 改性沥青混合料相当。

2) 复合改性材料中, 改性剂 B (再生 PE)可作为基础抗车辙剂, 改性剂 A (高分散橡胶粉)可以很好地补偿改性剂 B 带来的低温性能损失。

3) 现场试验路表明, 采用复合改性沥青混合料后, 每个月中面层的车辙量较普通沥青明显降低, 总车辙量降低一半, 路用性能优异。

4) 与试验路段的车辙实测值相比较, 本文的基于温度 - 轴载的车辙预估模型的车辙预估值计算误差较小, 可以反映路面车辙的真实发展情况, 为以后的车辙预估研究提供参考。

参考文献

- [1] 李洪印, 姜海龙, 张文武, 等. 基于胶粉和聚乙烯复合改性的沥青混合料综合性能试验研究[J]. 土木工程, 2019, 8(3): 576-586.
- [2] 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, 38(3): 525-529.
- [3] 杨朋, 张肖宁. PE 和 SBS 复合改性沥青混合料路用性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(10): 4044-4049.
- [4] Cao, W., Liu, S., Li, Y., *et al.* (2016) Rutting-Resistance Performance of SBS and Anti-Rutting Additive Composite-Modified Asphalt-Concrete Mixtures. *Journal of Testing and Evaluation*, **44**, Article ID: 20150024. <https://doi.org/10.1520/JTE20150024>
- [5] 缪逸辰. 水-荷载耦合作用下沥青混合料细观尺度域损伤特性研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [6] 李小江. 温度-荷载耦合作用下改性沥青混合料高温稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.