

不同改性剂掺量对 SBS 沥青混合料抗车辙性能的影响规律及其评价方法

刘乐¹ 全迅²

1 苏州科技大学 道路工程研究中心 2 苏州市公路事业发展中心

DOI:10.12238/etd.v6i2.12977

[摘要] 本研究针对极端天气与超载对沥青路面高温抗车辙性能的挑战,通过干拌法探究抗车辙剂掺量对SBS改性沥青混合料性能的影响规律。通过标准车辙试验及浸水车辙试验,对5种Super-20级配的沥青混合料(基质沥青混合料,SBS改性沥青混合料掺加0,1.5‰,3‰,4.5‰共4个不同量抗车辙剂)进行抗车辙性能的测试和分析。研究表明:在标准条件下,SBS改性混合料中抗车辙剂含量从0‰加至4.5‰,每加入1.5‰抗车辙剂,双改性沥青混合料的DS平均提升21.5%。而在浸水条件下,SBS改性混合料中抗车辙剂含量从0‰加至4.5‰,每加入1.5‰抗车辙剂,DS平均提升14.9%。经线性拟合与变异系数验证,浸水车辙试验能更有效评价双改性沥青混合料高温性能,且数据可靠性显著。研究为抗车辙剂在复杂环境下的应用提供理论依据。

[关键词] 沥青混合料; 标准车辙试验; 动稳定度DS; 浸水车辙试验

中图分类号: TV432+.7 文献标识码: A

The influence law of different modifier dosages on the rutting resistance performance of SBS asphalt mixture and its evaluation method

Le Liu¹ Xun Quan²

1 Suzhou University of Science and Technology, Road Engineering Research Center

2 Suzhou Municipal Highway Development Center

[Abstract] Aiming at the challenge of extreme weather and overload on high temperature rut resistance performance of asphalt pavement, this study explored the influence of anti-rut agent content on the performance of SBS modified asphalt mixture through dry mixing method. Through rut test and immersion rut test, the anti-rut performance of 5 kinds of super 20 graded asphalt mixtures (matrix asphalt mixture, SBS modified asphalt mixture mixed with 4 different amounts of anti-rut agents of 0, 1.5 ‰, 3 ‰, 4.5 ‰) was tested and analyzed. The research results show that: Under the conditions, the content of anti-rut agent in SBS modified mixture is increased from 0 ‰ to 4.5 ‰, and every 1.5 ‰ of anti-rut agent is added, the DS of double-modified asphalt mixture increases by 21.5% on average. Under the condition of immersion, the content of anti-rut agent in SBS modified mixture was increased from 0 ‰ to 4.5 ‰, and DS increased by 14.9% on average for every 1.5 ‰ of anti-rut agent added. By linear fitting and coefficient of variation verification, the immersion rut test can more effectively evaluate the high temperature performance of double modified asphalt mixture, and the reliability of the data is significant. The study provides a theoretical basis for the application of anti-rut agents under complex conditions.

[Key words] asphalt mixture; Rut test; Dynamic stability DS; immersion rut test

引言

沥青路面材料是道路工程中重要组成部分,对整个道路的质量及使用寿命起着关键作用,因此越来越被引起重视。近年来,

随着交通量、行车荷载特别是重载的增加以及高温极端气候的频频出现,沥青路面车辙问题还日益突出,严重影响路面的使用寿命和行车安全^[1]。

研究表明, 聚合物改性(如SBS)与抗车辙剂复配可显著改善沥青混合料的高温稳定性。例如, Zhang^[2]等通过湿拌法添加3%聚丙烯纤维, 使SBS改性沥青混合料动稳定度(DS)提升18%, 但未系统探讨干拌工艺下抗车辙剂掺量的影响规律。传统研究多聚焦于标准条件下的车辙性能^[3]测试, 而实际路面常面临雨水侵蚀与动态荷载耦合作用, 针对浸水条件的抗车辙评价体系尚不完善。Liu^[4]等对比了浸水与标准车辙试验结果, 发现水环境会加速沥青-集料界面剥离, 导致DS值下降约12%-20%, 但未结合双改性沥青体系分析抗车辙剂的补偿效应。现有文献中, 抗车辙剂掺量优化多依赖经验阈值, 缺乏基于统计验证的剂量-性能量化模型。杨毅^[5]通过添加不同剂量抗车辙剂后, 实现逐步提升沥青混合料抗水坏和抗车辙性能。包雪巍^[6]通过试验发现掺入抗车辙剂后沥青混合料除了高温抗车辙性能显著提升, 沥青混合料的水稳定性和低温抗裂性能也有较大改善。胡乃永^[7]通过掺入新型抗车辙剂进入沥青混合料, 获得最佳掺量的抗车辙剂, 模拟数值分析抗车辙剂的性能效果。陈瑞考^[8]对室内试验得出沥青混合料高温稳定性与抗车辙剂掺量呈正相关关系的结论。倪敬松^[9]诠释车辙形成原因并用工程案例分析抗车辙剂对工程质量性价比的贡献。马峰^[10]得出干拌, 湿拌条件下抗车辙剂均能显著改善沥青混合料的高温性能且抗车辙剂在干拌法制得的混合料中发挥双重改性作用的结论。陈海鹏^[11]得出浸水车辙试验可以用来评价沥青混合料的水稳定性, 同时也可以用于评价其抗车辙性能的结论。

针对不同抗车辙剂掺量的沥青混合料的抗车辙性能规律不明确这个难题, 同时针对浸水条件的抗车辙评价体系尚不完善的这个难题, 本研究针对以上不足之处, 以干拌法工艺为基础, 研究SBS改性沥青中抗车辙剂L的掺量梯度(0-4.5%)对Super-20级配沥青混合料抗车辙性能的影响, 并通过标准与浸水车辙试验对比, 揭示水环境对抗车辙剂补偿效应的作用机制。同时, 采用线性拟合与统计验证方法(变异系数、均方差)建立掺量-性能量化模型, 弥补传统经验法的不足。研究不仅为复杂环境下的抗车辙剂效能评价提供新方法, 也为优化双改性沥青混合料设计提供理论依据。

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

表1 双龙基质沥青主要技术指标

测试项目	测试结果	技术指标	判定结果
25° C 针入度 (0.1mm)	67.5	60-80	合格
软化点 (° C)	48.5	≥46	合格
10° C 延度 (cm)	18	≥15	合格
60° C 动力粘度 (Pa·s)	225	≥180	合格
旋转薄膜烘箱试验 (163° C/85min)	质量损失 (%)	≤0.5	合格
	延度 (10° C, cm)	≥4	合格
	针入度 (25° C, 0.1mm)	≥58	合格

1.1.1 沥青。本次实验使用的基质沥青来源于某公司提供的韩国双龙70号基质沥青, 其基本性能见表1, 其基本性能符合规范要求。采用的SBS改性沥青, 来自于某路面公司, 主要技术指标如表2所示。试验所用的抗车辙剂为某厂家生产的L型抗车辙剂。

表2 SBS改性沥青主要技术指标

项目	25° C 针入度 (0.1mm)	软化点 (° C)	5° C 延度 (cm)	RTFOT 后的残留物		
				质量变化 (%)	针入度比 (%)	5° C 残留延度 (cm)
技术指标	30-70	>65	>20	≤±1.0	≥65	≥15
检测结果	56.7	84.1	31.5	0.23	76	24
试验方法	T0604	T0606	T0605	T0609	T0604	T0605

1.1.2 集料。本次实验所用的粗细集料均来源于某路面公司, 其石灰岩粒径共有四种尺寸, 表3为石灰岩各档集料的性能指标。

表3 粗细集料的基本性能指标

集料尺寸 (mm)	0-3	3-5	5-15	15-25
吸水率 (%)	1.85	0.72	0.83	0.73
表观密度 (g·cm ⁻³)	2.734	2.732	2.722	2.725
毛体积密度 (g·cm ⁻³)	2.731	2.701	2.698	2.688

1.1.3 矿粉。矿粉来自于某路面公司, 表4为矿粉的基本性能指标。

表4 矿粉的基本性能指标

项目名称	试验数值	规范要求
表观密度 (t/m ³)	2.700	≥2.5
含水率 (%)	0.4	≤1
亲水系数	0.8	<1
塑性指数 (%)	2.6	<4%

1.2 配合比设计及双改性沥青混合料制备工艺

图1为车辙板试件从制作到成型的全过程, 从前期计算车辙板试件所需集料、沥青、矿粉的用量, 同时说明沥青混合料拌合工艺。

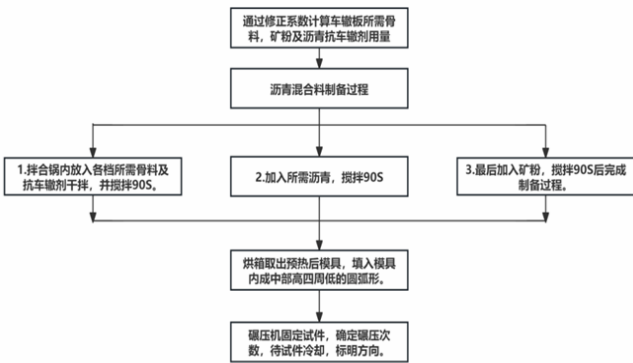


图1车辙试件制备工艺

本研究试验采用Super-20间断级配沥青混合料, 所用的粗细集料均为石灰岩, 集料各档粒径范围为: 0-3mm, 3-5mm, 5-15mm, 15-25mm, 均取自苏州市三创路面工程有限公司。各档集料通过实验室筛分机筛分后区分粒径存放并精确到0.1g称量。根据《公路

工程集料试验规程》^[12] (GTJE42-2019) 对试验采用的石灰岩集料和矿粉进行物理相关指标试验, 级配曲线图如图2所示。Superpave-20 沥青混合料的级配设计通过合成级配曲线图中的禁区与控制点实现对集料结构的精细化控制, 禁区边界线位于0.3mm至2.36mm筛孔区间, Superpave-20级配的禁区上限变化情况为13.7%-34.6%, 而控制点主要对0.075mm, 2.36mm, 19mm的3种筛孔区间作出限制要求, 在0.075mm时控制点范围为2%-8%, 在2.36mm时控制点范围为23%-49%, 在19mm时控制点范围为90%-100%。

Superpave-20设计标准如下, 在压实次数时, VMA需大于等于13%, VFA需处于65%-75%, 粉胶比比例需控制在0.6-1.2, 有效压实度应小于等于89%^[13]。通过以上实验和分析, 选定级配3为设计级配, 各档配合比为1:2:3:4; 矿粉=23.0%: 22.0%: 34%:19%:2%, 最佳沥青用量为4.2%, 最佳油石比为4.4%, 沥青混合料在4.2%胶结料含量时的特性如表5所示, 需对混合料设计进行性能验证。

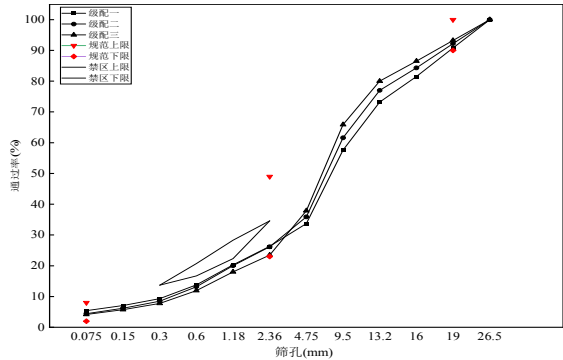


图2 Super-20合成级配曲线图

表5 沥青混合料在4.2%胶结料含量时的特性

混合料特性	结果	标准
空隙率 (%)	4.0	4.0%
VMA (%)	13.0	≥13%
VFA (%)	68.9	65%-75%
粉胶比	1.1	0.6-1.2
最初压实度 (%)	86	<90%

表6 马歇尔试验技术指标表

项目名称	数据	规范要求
稳定度 (kN)	13.53	>7.5
空隙率 (%)	4.4	3-6
击实次数 (次)	75	75
沥青饱和度 (%)	73.27	70-85
流值 (0.1mm)	34.5	20-40

对于Super-pave沥青混合料, 需采取马歇尔成型方法获取试件, 需求得马歇尔试验技术指标, 所得试验数据于表6。

1.3 试验方法

一般的70#基质沥青与SBS改性沥青相比, 其高温稳定性与

黏结性能较差, 而对基质沥青改性后, 可以明显的提升其抗高温性能, 而抗车辙剂对于沥青抗高温性能尤其明显。在标准温度下, 不同实验条件下, 不同沥青混合料对于高温稳定性的变化趋势也不同, 最终导致车辙深度也不同。采用70#基质沥青混合料, SBS改性沥青混合料含0%, 1.5%, 3%, 4.5%共5种抗车辙剂掺量的沥青混合料, 这些沥青混合料可以代表一般(基质), 中等(SBS改性)和优秀(SBS和抗车辙剂双改性)三种不同的高温抗车辙能力在标准温度60° C及标准实验条件下和浸水条件下, 进行车辙实验, 通过DS数值判断沥青混合料抗车辙性能。

标准的车辙试验, 需按照级配要求等制备300mm×300mm×50mm的沥青混合料试件, 车辙试验是在温度60℃、荷载0.7Mpa、速率42次/min标准条件下进行的。预热试件, 达到试验温度后将试件连同试模放入车辙仪内并且固定, 车辙试验轮行走方向与试件轮碾方向一致, 将热传感器置于试件表面, 保温6h后开启车辙仪进行车辙试验, 记录数据, 并对试件进行脱模处理^[14]。

浸水车辙实验是指将试件在饱水状态保温6h, 达到试验温度后将试件固定, 将热传感器置于水中, 使水位保持在试件上方2cm左右。其余操作同标准车辙实验。

沥青混合料车辙实验国内评价指标一般是动稳定度DS。

$$DS = \frac{(t2 - t1) \times N}{d2 - d1} \times C1 \times C2$$

式中: t1、t2为车辙试验的碾压时间, t1=45min; t2=60min; d1、d2分别为其对应的碾压深度; N为车辙的往复加载次数, 一般取42次/min; c1、c2为修正系数, 一般取1。动稳定度这项指标在一定程度上可以反映沥青混合料高温稳定性的优劣, 对此, 除了车辙深度进行研究, 可以对其稳定性进行分析^[15]。

2 试验结果和分析

对于70#基质沥青混合料, SBS改性沥青混合料含0%, 1.5%, 3%, 4.5%共四种抗车辙剂掺量的沥青混合料进行标准60° 条件下标准车辙试验和浸水车辙试验。沥青混合料编号如表7所示, 同时五种沥青混合料的标准车辙和浸水车辙主要数据如下表8, 表9所示。

表7 沥青混合料编号

编号(抗车辙水平)	级配类型	沥青	添加剂
A(一般)	Super-20	70#基质沥青	无
B(中等)	Super-20	SBS 改性沥青	无
C(优秀)	Super-20	SBS 改性沥青	1.5%抗车辙剂 L
D(优秀)	Super-20	SBS 改性沥青	3%抗车辙剂 L
E(优秀)	Super-20	SBS 改性沥青	4.5%抗车辙剂 L

表8为不同高温抗车辙能力的沥青混合料可以从其稳定度体现。标准车辙试验条件下70#基质沥青混合料, DS为1905次, SBS改性(SBS4.5%沥青重量)混合料DS为3993次, SBS改性沥青混合料中抗车辙剂含量从1.5%加至4.5%, 每加入1.5%抗车辙剂, DS平均提升11.1%。这个结果显示, 标准车辙试验条件下SBS改性使基质沥青混合料提高了一倍(100%)的抗车辙能力。抗车辙剂的加入,

继续提高双改性沥青混合料的抗车辙能力。其方差值随抗车辙能力的提高而增大,但其变异系数并没有明显区别。

表8 标准车辙试验条件相关数据

沥青混合料类型	车辙深度(mm)		动稳定度 (次/mm)	平均值	均方差	变异系数
	45min	60min				
A1	3.661	3.953	2157	1906	256.13	0.13
A2	3.732	4.115	1645			
A3	3.597	3.926	1915			
B1	2.911	3.047	4632	3993	555.97	0.14
B2	3.059	3.233	3620			
B3	2.95	3.119	3727			
C1	2.618	2.737	5294	5867	688.66	0.12
C2	2.535	2.630	6631			
C3	2.494	2.605	5676			
D1	2.196	2.295	6363	6555	388.97	0.06
D2	2.248	2.348	6300			
D3	2.227	2.317	7003			
E1	1.905	1.985	7875	7164	926.48	0.13
E2	1.893	1.977	7500			
E3	1.779	1.882	6116			

表9 浸水车辙试验条件相关数据

沥青混合料类型	车辙深度(mm)		动稳定度 (次/mm)	平均值	均方差	变异系数
	45min	60min				
A1	4.616	5.133	1218	1297	82.16	0.06
A2	4.578	5.066	1291			
A3	4.399	4.885	1382			
B1	3.239	3.432	3264	3112	133.46	0.04
B2	3.342	3.551	3014			
B3	3.293	3.499	3058			
C1	3.255	3.428	3642	3424	342.44	0.10
C2	3.175	3.383	3029			
C3	3.180	3.355	3600			
D1	3.029	3.182	4117	4024	262.56	0.07
D2	3.088	3.237	4228			
D3	3.029	3.198	3728			
E1	2.788	2.935	4286	4718	622.07	0.13
E2	2.793	2.909	5431			
E3	2.711	2.853	4437			

表9为不同高温抗车辙能力的沥青混合料可以从其稳定度体现。浸水车辙试验条件下70#基质沥青混合料,DS为1297次,SBS改性(SBS4.5%沥青重量)混合料DS为3112次,SBS改性沥青混合料中抗车辙剂含量从1.5%加至4.5%,每加入1.5%抗车辙剂,DS平均提升18.9%。结果显示,浸水试验条件下SBS改性使基质沥青混合料提高140%的抗车辙能力,相较于标准车辙,浸水车辙的SBS改性显著提高抗车辙能力。随着后续抗车辙剂的加入,继续提高双改性沥青混合料的抗车辙能力。浸水车辙下每加入1.5%抗车辙剂的DS提升率>标准车辙条件,浸水条件下方差值随抗车辙能力的提高而增大,变异系数也出现明显增长。

两种条件的车辙数据如图3所示。将上列数据按SBS沥青混合料的不同抗车辙剂掺量在标准车辙及浸水车辙条件下进行线性拟合分析,分析结果如图4所示。

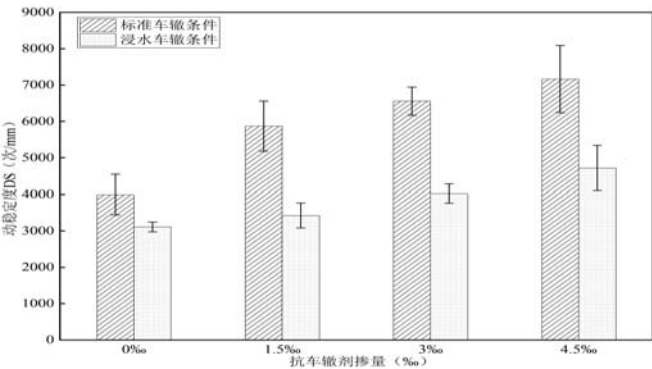


图3 标准条件及浸水条件车辙数据对比图

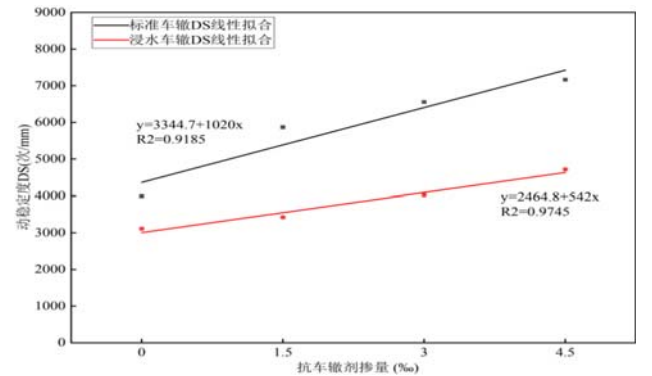


图4 标准条件及浸水条件线性拟合分析图

图4显示从线性拟合分析,对DS和抗车辙剂掺量2个指标进行线性拟合分析,由图可知在标准及浸水条件下,线性拟合曲线的相关系数均大于0.9,浸水条件的相关度大于标准试验条件的相关度。浸水条件下的相关性更好。表明浸水条件下DS与抗车辙剂掺量比值的稳定性更好。

浸水车辙相比较于标准车辙,一方面从DS指标来分析,A类沥青混合料试件DS下降约31.9%,B类沥青混合料试件DS下降约22.1%,C类沥青混合料试件DS下降约41.6%,D类沥青混合料试件DS下降约38.6%,E类沥青混合料试件DS下降约34.1%。由结果显示,浸水车辙条件减少了沥青混合料的DS,减弱了沥青混合料的抗车辙性能。因为沥青混合料试件在饱水状态下内部黏结力变

差, 沥青与骨料之间粘附力降低, 从而降低其抗车辙性能。五类沥青混合料中, C类沥青混合料试件DS下降最为明显, 双改性沥青混合料在掺入1.5%抗车辙剂时, 受高温水浴作用效果显著。

另一方面浸水车辙相比较于标准车辙从变异系数方面分析, A类沥青混合料试件变异系数下降约53.8%, B类沥青混合料试件变异系数下降约71.4%, B类沥青混合料试件变异系数下降约16.7%, D、E两类沥青混合料试件变异系数几乎不变。结果显示, 沥青混合料在SBS改性后经试验条件变化后数据变化不稳定, 但在抗车辙剂掺量增加后, 数据变化趋于稳定。其中B类沥青混合料试件变异系数下降程度最大, 表明基质沥青混合料经SBS改性后, 从标准车辙条件变化为浸水车辙条件时, 其DS数据变化大, 数据不稳定且离散性较大。

变异系数及方差反映DS指标稳定性。标准条件下SBS改性使混合料试件DS急剧提升但不稳定, 抗车辙剂掺量增加对于混合料DS指标稳定性无改善作用。浸水条件下变化情况与标准条件大致一样, 但浸水条件的DS指标变异系数普遍小于标准条件。经2种试验方法对比, SBS改性沥青+3%抗车辙剂的混合料在2种试验条件下DS指标变异系数更小, 数值更稳定。

3 结语

(1) 基质沥青混合料动态稳定度最低, 抗车辙性能显著弱于改性材料。(2) 4.5% SBS改性使DS提升100%~140%, 引入抗车辙剂形成双改性体系后, DS与抗车辙剂掺量呈显著线性正相关($R^2 > 0.95$)。(3) 标准试验条件下, 双改性体系中每1.5%抗车辙剂掺量的DS增长率较浸水条件高约30%, 表明干燥环境改性效率更优。标准条件DS值普遍高于浸水条件, 反映水分浸入对沥青混合料抗变形能力的削弱作用。(4) 浸水条件下DS变异系数较标准条件降低12%~25%, 且87.5%样本CV小于等于0.1 (仅SBS+4.5%抗车辙剂组合CV大于0.1), 表明浸水试验数据离散性更低、可靠性更优。DS变异系数随材料改性层级增加而增大(基质沥青<单改性SBS<双改性), 提示复杂改性可能引入微观结构异质性。因此采用浸水车辙试验作为工程实践中优选的沥青混合料高温性能评价方法。

[参考文献]

- [1] 周玥, 曹亚东, 李健, 等. 抗车辙剂对沥青混合料的性能影响及改性机理研究[J]. 城市道桥与防洪, 2020, (11): 153-156+20.
- [2] 张永利, 陶清容. 厂拌热再生沥青混合料马歇尔配合比设

计方法改进[J]. 市政技术, 2018, 36(01): 203-205.

[3] 杨新宇, 杨硕. 聚氨酯/聚乙烯复合改性沥青混合料的路用性能研究[J]. 西部交通科技, 2024, (10): 17-19+48.

[4] 陈振富, 吴旦, 全锋, 等. 沥青路面车辙主要影响因素综述[J]. 中外公路, 2016, 36(04): 68-72.

[5] 杨毅. 面层抗车辙剂施工技术在沥青混凝土中的应用研究[J]. 黑龙江交通科技, 2019, 42(03): 21-22.

[6] 包雪巍, 侯权河, 张富有. 沥青混凝土中面层抗车辙剂施工技术研究[J]. 公路, 2018, 63(10): 50-54.

[7] 胡乃永. 掺DXG-1抗车辙剂沥青混合料性能试验研究[D]. 重庆交通大学, 2018.

[8] 陈瑞考, 魏学利, 宋玲, 等. 沥青混合料中掺加定量抗车辙剂后的路用性能[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(36): 120-124.

[9] 倪敬松. 抗车辙剂沥青混凝土的适用范围与技术要求[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(06): 24-25.

[10] 马峰, 张昭区, 傅珍, 等. 抗车辙剂改性沥青混合料制备方法对其高温性能的影响[J]. 筑路机械与施工机械化, 2019, 36(8): 41-44+49.

[11] 陈海鹏, 石鹏程, 高启聚, 等. 基于浸水车辙试验的沥青混合料水稳定性和抗车辙能力的研究[J]. 公路, 2016, 61(03): 149-154.

[12] 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.

[13] 马天才, 白素霞, 琚晓辉. 基于Superpave沥青混合料水准 I 的混合料设计方法[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016, 12(12): 60-64.

[14] Zhang W, Shen S, Wu S, et al. Prediction model for field rut depth of asphalt pavement based on Hamburg wheel tracking test properties[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 9(9): 4017098.

[15] 张岩. 橡胶颗粒沥青混合料修正的动稳定度研究及微观分析[D]. 内蒙古农业大学, 2018.

作者简介:

刘乐(2000—), 男, 汉族, 江苏仪征人, 硕士研究生, 研究方向: 路基路面材料和结构。