

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.09.058

# 高黏剂对高黏弹改性沥青宏观性能和微观结构的影响

邹武坤<sup>1</sup>, 赵梦珍<sup>2</sup>, 丁旋<sup>1</sup>, 周启伟<sup>2</sup>, 宋兴华<sup>3</sup>

(1. 吉安市公路勘察设计院, 江西 吉安 343000; 2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆市 400067;  
3. 重庆交通大学, 重庆市 400074)

**摘要:** 通过常规性能试验、动力黏度试验、弹性恢复试验和 Brookfield 黏度试验, 研究了高黏剂种类和掺量对高黏弹改性沥青宏观性能的影响, 利用荧光显微镜探究了改性沥青微观结构变化, 评价了自主研发的高黏剂制备的 STC-10 高黏弹沥青混合料路用性能。结果表明: 不同类型高黏剂均能显著降低改性沥青针入度, 提高软化点和延度, 但对 60℃ 动力黏度和 135℃ 黏度有不同影响。高黏剂掺量提高导致改性沥青中零散的聚合物微粒向网络结构转变, 网络结构间出现明显过渡区, 对改性沥青高低温性能的增强具有重要作用。STC-10 沥青混合料各项性能指标均满足相关规范技术要求, 证明高黏弹改性沥青和 STC-10 级配在超薄罩面中应用具有可行性。研究成果为新型高黏弹改性沥青在同步超薄罩面中的应用提供了科学依据。

**关键词:** 道路工程; 高黏弹改性沥青; 宏观性能; 微观结构; STC-10 沥青混合料; 路用性能

**中图分类号:** U414

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2023)09-0246-05

## 0 引言

高黏弹改性沥青(60℃ 动力黏度大于 20 000 Pa·s, 25℃ 弹性恢复大于 85% 的沥青)具有优异的高温抗车辙性能, 同时兼顾低温抗裂性能, 受到越来越多的市场青睐<sup>[1-3]</sup>, 常用于高等级公路的应力吸收层、磨耗层、排水路面与桥面铺装等领域<sup>[4-6]</sup>。

国内外对高黏弹改性沥青的黏弹特性、混合料的路用性能等开展了系列研究, 为其工程应用提供了科学依据。Özay 等<sup>[7]</sup>将 TPS 添加至 SBS 改性沥青中, 发现 TPS-SBS 高黏复合改性沥青的高低温性能和抗水损害能力均有明显提高, 但其 135℃ 黏度过高, 施工和易性较差。Yan 等<sup>[8]</sup>通过添加质量分数为 7.5% 的 SBS 制备了高黏弹改性沥青, 考察改性沥青老化行为, 并利用指数回归方程和线性回归方程表征了老化改性沥青的复数剪切模量和相位角演变行为。Mansourian 等<sup>[9]</sup>采用 EVA、HDPE 和纳米黏土制备新型聚合物纳米复合材料, 并用于改性沥青, 发现无论是线性还是非线性黏弹性行为中, 聚合物纳米复合材料均能提高改性沥青的低温抗裂性能和抗车辙性能。

张争奇等<sup>[10]</sup>基于复合改性技术制备的 SBS- 聚氨酯复合改性沥青, 60℃ 动力黏度达到 34 217 Pa·s,

弹性恢复达到 97%, 同时具有较好的高低温性能和储存稳定性。刘斌清等<sup>[11]</sup>利用滞后环试验评价指标、Carreau 模型拟合的零剪切黏度、车辙因子和软化点对高黏弹改性沥青高温性能进行评价, 发现前两者对于不同类型改性沥青高温性能具有较好的区分度, 评价效果最好。孙雅珍等<sup>[12]</sup>通过弯曲梁蠕变试验和数值模拟相结合的方法标定了高黏弹沥青砂的黏弹性参数, 解析了温度影响下梁底弯拉应变随时间的演化规律。苏忠高<sup>[13]</sup>采用浸水车辙试验评价了不同类型超薄层沥青混合料的水稳定性, 选用偏粗的级配以确保空隙率大于 10%, 进而利于排水、降噪和提高抗滑能力, 建议设计超薄路面时要同样重视选用适合的胶结料和级配类型。肖军等<sup>[14]</sup>在 12% 掺量的 SBS 改性沥青中复掺聚酯纤维和玄武岩纤维, 显著改善了高黏弹改性透水沥青混合料的黏附性、水稳定性、高温性能和抗疲劳性能。王新科等<sup>[15]</sup>通过与 SBS 改性沥青混合料进行对比, 发现高黏弹改性沥青具有更加优异的路用性能, 且更能适应较低温环境下的施工。

以往研究多关注高黏弹改性沥青及其混合料的宏观性能, 对其微观结构的报道较少, 且高黏弹改性沥青用于薄层罩面的研究较为少见, 尤其采用同步薄层罩面 STC-10 混合料级配。本研究首先考察不同类型高黏剂对高黏弹改性沥青宏观性能和微观结构的影响, 明确最佳的高黏剂类型和用量。其次对采用

收稿日期: 2022-11-21

作者简介: 邹武坤(1982—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事公路养护技术咨询及设计工作。

STC-10 级配类型的高黏弹改性沥青混合料进行路用性能评价,为新型高黏弹改性沥青及其混合料在超薄罩面中的应用提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 原材料

SBS 改性沥青采用市面上常见的成品 SBS 改性沥青,针入度、软化点、5℃延度分别为  $56.5 \times 0.1$  mm、84.0℃、35.9 cm。高黏剂选用自主研发的高黏剂和 2 种国产直投高黏剂,分别命名为高黏剂-1、高黏剂-2、高黏剂-3。

粗细集料均为玄武岩,集料分 10~13 mm、5~10 mm、0~5 mm 三档,矿粉为石灰石矿粉。集料和矿粉的各项指标均满足规范要求。纤维采用玄武岩纤维,直径 10~13  $\mu\text{m}$ ,长度 6 mm,断裂强度 0.54 N/tex,拉伸强度 2 430 MPa,拉伸弹性模量 87.2 GPa。

表 1 矿料级配

项目	不同筛孔(mm)尺寸通过率 /%								
	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配上限	100	90	30	22	14	9	7	5	4
级配下限	100	100	45	32	25	15	12	10	7
级配中值	100	95	37.5	27	19.5	12	10.5	7.5	5.5
合成级配	100	90.5	43.8	22.9	15.4	11.0	8.4	7.7	6.2

表 2 STC-10 沥青混合料马歇尔试验结果

沥青用量 /%	最大理论密度 $/(g \cdot \text{cm}^{-3})$	毛体积相对密度 $/(g \cdot \text{cm}^{-3})$	空隙率 /%	稳定度 /kN	流值 /mm	VMA /%	VFA /%
4.2	2.595	2.256	13.3	10.6	6.4	19.2	30.9
4.5	2.560	2.269	11.4	9.3	6.8	18.8	39.0
4.8	2.561	2.273	12.4	8.7	6.2	19.7	36.9
5.1	2.580	2.273	11.9	8.8	6.6	18.6	36.0
5.4	2.521	2.274	10.0	9.5	6.9	18.6	47.3

### 1.4 沥青及其混合料测试方法

针对高黏弹改性沥青,参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)(简称“规程”)相关试验方法,对其进行三大指标(针入度、软化点、延度)、弹性恢复、60℃动力黏度以及 135℃黏度测试,评价改性沥青的宏观物理性能。其中,60℃动力黏度用于判断改性沥青是否为高黏弹改性沥青;135℃黏度为表观黏度,反映了改性沥青的施工性能。借助 LW300LFT 型荧光显微镜考察改性沥青的微观结构,放大倍数分别为 100 倍和 400 倍。

针对 STC-10 改性沥青混合料,参照规程相关试验方法,在最佳油石比条件下成型混合料车辙板、标

### 1.2 高黏弹改性沥青制备

采用高黏剂与 SBS 改性沥青高温共混方式制备高黏弹改性沥青,制备过程如下:

(1)将 SBS 改性沥青加热至 180℃,将称重后(外掺 2%、4%、6%、8%)的高黏剂缓慢添加至 SBS 改性沥青,搅拌均匀。

(2)启动高速剪切机,剪切速率为 4 500 rpm,剪切 30 min。

(3)将混合物充分搅拌,令高黏剂与 SBS 改性沥青充分反应,并除去气泡。搅拌 60 min 后,取出样品备用。

### 1.3 沥青混合料配合比设计

(1)级配设计。本研究采用 STC-10 型级配(见表 1)。纤维用量为混合料的 4%。

(2)最佳油石比。采用标准马歇尔设计方法确定沥青混合料的最佳沥青用量,试验结果见表 2。经计算,最佳油石比为 4.7%。

准马歇尔试件,进行车辙试验、浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验。根据规程 T 0732—2011 和 T 0733—2011,通过谢伦堡沥青析漏试验和肯塔堡飞散试验,分别检验混合料的最大和最小沥青用量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 高黏剂类型对高黏弹改性沥青宏观性能影响

考察不同类型高黏剂掺量对高黏弹改性沥青宏观性能的影响,试验结果如图 1~ 图 5 所示。需要说明的是,本研究涉及的高黏弹改性沥青弹性恢复均大于 95%,故不进行专门讨论。为表述方便,称高黏剂-1 制备的高黏弹改性沥青为 1# 高黏弹改性沥

青,以此类推。随掺量增加,1#和2#高黏弹改性沥青25℃针入度均呈下降趋势,以1#高黏弹改性沥青的下降幅度为较大者,达到17.0%;3#高黏弹改性沥青针入度下降趋势不明显,下降幅度仅为1.6%。表明高黏剂的加入,会导致改性沥青变硬,且不同类型高黏剂对其硬化程度不同。

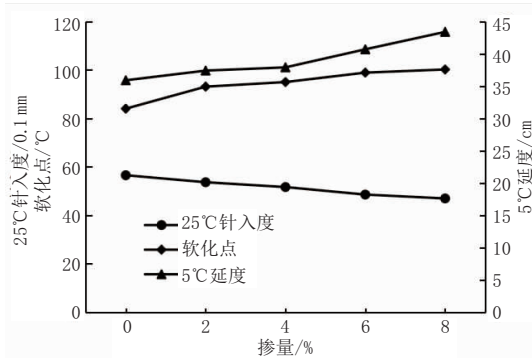


图1 高黏剂-1掺量对改性沥青三大指标的影响

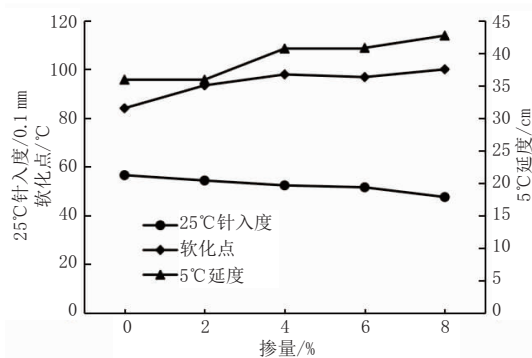


图2 高黏剂-2掺量对改性沥青三大指标的影响

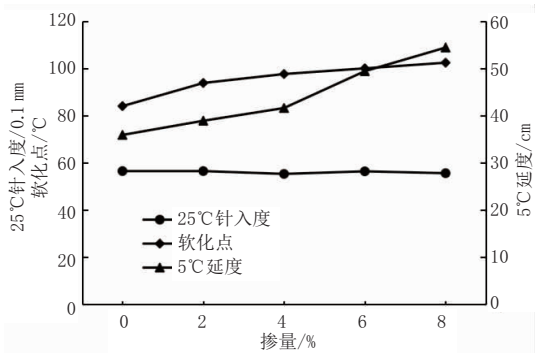


图3 高黏剂-3掺量对改性沥青三大指标的影响

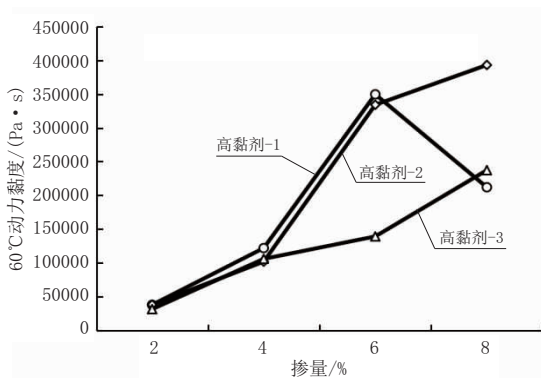


图4 高黏剂掺量对改性沥青60℃动力黏度的影响

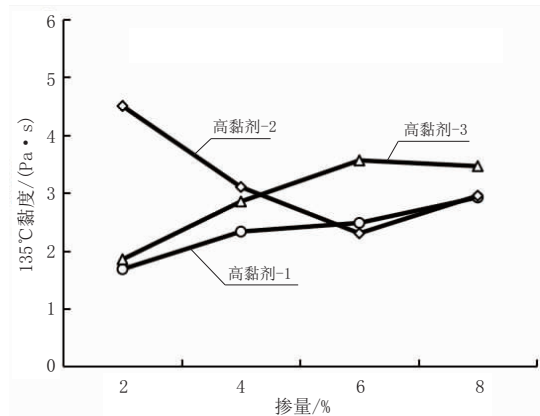


图5 高黏剂掺量对改性沥青135℃黏度的影响

掺量对3种高黏弹改性沥青软化点有显著影响,均随掺量提高呈上升趋势,且在掺量达到2%之后,上升速率变缓。其中1#高黏弹改性沥青上升幅度由前期(掺量由0%增加到2%)的10.8%降至后期(掺量由6%增加到8%)的1.3%,2#高黏弹改性沥青由前期的11.2%降至后期的3.3%,3#高黏弹改性沥青由前期的11.7%降至后期的2.4%。整体来看,3种高黏弹改性沥青的软化点抬升幅度分别为19.3%、19.0%和21.9%,高黏剂-3对高黏弹改性沥青的软化点影响最大。由此可知,不同类型高黏剂均能有效提高高黏弹改性沥青高温性能。

5℃延度随掺量提高基本呈上升趋势。高黏剂掺量超过4%后,1#和3#高黏弹改性沥青延度有更加明显的抬升,2#高黏弹改性沥青变化较为平稳。1#和2#高黏弹改性沥青延度最终抬升至40~45 cm,3#高黏弹改性沥青延度有更加显著的提升,达55 cm左右,说明高黏剂-3对改性沥青低温抗裂性能提升最为明显。

图4表明,低掺量(2%和4%)时,3种高黏剂对改性沥青60℃动力黏度的提升水平相当;高掺量(6%以上)时,不同高黏剂对改性沥青动力黏度影响规律不同。高黏剂-1掺量达到8%时会导致改性沥青动力黏度大幅降低,高黏剂-1和高黏剂-2则随掺量逐步提高,提升改性沥青动力黏度值。从60℃动力黏度角度来看,不同类型高黏剂在高掺量条件下,对同种改性沥青具有选择性,高黏剂-2对高黏弹改性沥青动力黏度的提升最为显著。

图5表明不同类型高黏剂掺量对改性沥青135℃黏度的影响规律。1#高黏弹改性沥青黏度随高黏剂掺量增加呈上升趋势,掺量达8%时,黏度值仍满足SHRP沥青结合料性能规范中对改性沥青135℃黏度不超过3 Pa·s的要求,施工性能良好。2#

高黏弹改性沥青则随高黏剂掺量增加呈先下降后抬升的趋势,在掺量为6%时达到最小值,且为3种改性沥青中的最低者。3#高黏弹改性沥青与2#高黏弹改性沥青的变化趋势相反,在掺量为6%时黏度达到最大值,超过SHRP规范对改性沥青黏度的要求,施工性能在3种改性沥青中较差。

综上所述,不同类型高黏剂对高黏弹改性沥青的宏观性能影响规律不尽相同,尤其在60℃动力黏度和135℃黏度方面,高黏剂类型对改性沥青具有明显的配伍性。高黏剂-3能够显著提升改性沥青高低温性能,但其对60℃动力黏度的提高有限,且制备的改性沥青135℃黏度普遍偏大,施工和易性较差。高黏剂-1在掺量8%以内均能保证改性沥青具有较低的135℃黏度,施工性能最佳,同时对提高改性沥青的高低温性能有较为显著的作用。高黏剂-2对改性沥青三大指标的影响与高黏剂-1相近,但改性沥青60℃动力黏度在高黏剂掺量6%以下均低于高黏剂-1改性沥青。综合常规性能指标结果,本研究选择自主研发的高黏剂-1开展改性沥青微观结构和混合料性能研究。

## 2.2 高黏剂类型对高黏弹改性沥青微观结构影响

由于1#高黏弹改性沥青在高黏剂掺量为8%时的60℃动力黏度下降明显,故仅考察2%、4%、6%掺量下高黏弹改性沥青的微观结构,结果如图6所示。掺量为2%时,改性沥青中出现繁密的点状结构,为聚合物微粒在紫外线的照射下激发出的荧光<sup>[16-17]</sup>,400倍视野下可以看到,亮点有向线型结构转变的趋势。掺量达到4%时,在400倍视野下可明显看到,结构中出现较多线型结构,部分线型结构相互搭接形成少量网络结构。掺量为6%时,视野中出现大量网络结构,且不同区域的网络结构间出现明显的过渡区。高黏弹改性沥青中形成的网络结构有助于提升沥青的高温抗变形能力和弹性恢复能力,由于网络结构分布均匀致密,对材料内部微裂缝的发展产生阻碍<sup>[18]</sup>,有助于提高改性沥青低温下的抗拉裂能力。

## 2.3 STC-10 沥青混合料性能评价

采用1#高黏弹改性沥青制备STC-10沥青混合料,其中高黏剂的掺量为基质沥青的6%。混合料路用性能评价结果列于表3,各项指标均满足相关规范技术要求。

由车辙试验结果可知,STC-10沥青混合料的动稳定度为5500次/mm,高温抗车辙变形能力较强。高黏弹改性沥青混合料采用空隙型同步薄层罩面混

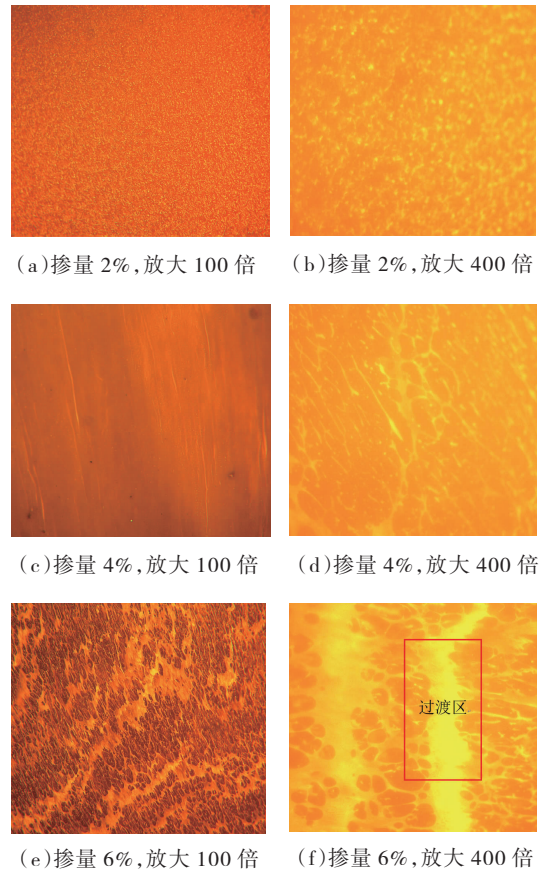


图6 高黏弹改性沥青的微观结构

合料类型,具有合理的骨架空隙结构,采用玄武岩纤维能够进一步增强混合料的抗车辙性能。

STC-10高黏弹改性沥青混合料的残余稳定度和冻融劈裂强度比远大于规范中的技术要求,具有优异的抗水损害能力。由此可见,通过自主研发的高黏剂制备高黏弹改性沥青能够较好地裹覆集料,提供较高的黏结力以维持集料在荷载下的抗剪切变形能力。同时,高黏弹改性沥青具有优异的低温抗裂性能,在冻融循环条件下不易出现胶结料层面的微裂缝,保证了集料间沥青膜的完整性,对其抗压或抗剪切性能的提升有利。

沥青析漏试验指标用于限定沥青用量,以防止混合料在运输、施工过程中出现沥青滴漏或流淌现象。飞散试验指标用于检验最小沥青用量,防止由于沥青用量不足导致集料脱落而散失<sup>[19-20]</sup>。由试验结果可知,析漏损失和飞散损失均满足规范要求,说明本研究采用的最佳油石比合理。

## 3 结论

(1)高黏剂类型和掺量对高黏弹改性沥青三大指标的影响规律相近,随掺量的增加均能显著降低25℃针入度,提高软化点和5℃延度。但对高黏弹改

表3 STC-10 沥青混合料路用性能试验结果

试验方法	项目	试验结果	技术要求
车辙试验	动稳定度/(次·mm)	5 500	≥5 000
	正常稳定度/kN	8.8	
浸水马歇尔试验	浸水稳定度/kN	8.2	
	残余稳定度/%	93.2	≥85
冻融劈裂试验	RT1/MPa	0.68	
	RT2/MPa	0.66	
	TSR/%	97.0	≥80
谢伦堡析漏试验	析漏损失/%	0.66	≤0.8
肯塔堡飞散试验	飞散损失/%	97.0	≤10

性沥青的 60℃动力黏度和 135℃黏度的影响规律不尽相同。自主研发的高黏剂 -1 在高掺量(8%)条件下会导致改性沥青动力黏度大幅下降,高黏剂 -2 和高黏剂 -3 分别在低掺量(4%以下)和高掺量(6%以上)条件下降低改性沥青的施工和易性。

(2)高黏弹改性沥青随高黏剂掺量由 2%提高至 6%,微观结构由零散的聚合物微粒向网络结构转变,网络结构之间出现明显的过渡区,对提高高黏弹改性沥青的高温抗变形和低温抗裂能力具有重要作用。

(3)利用自主研发的高黏剂制备 STC-10 高黏弹改性沥青混合料,具有优异的高温性能和水稳定性,能够满足薄层罩面关于抗车辙和抗水损等的特殊路用性能要求。

参考文献:

[1] GB/T 30516—2014,高粘高弹道路沥青[S].  
 [2] 熊子佳,程金梁,邓成,等.高粘改性剂对沥青及 OGFC 混合料性能的影响[J].大连交通大学学报,2017,38(5):94-97.  
 [3] 豆怀兵,陈拴发,祝斯月,等.高粘改性沥青胶浆粘弹特性研究[J].武汉理工大学学报,2014,36(4):53-57.

[4] 赵丽华,杨志浩,许斌,等.基于透水性能的全透水沥青路面结构设计[J].中外公路,2019,39(4):26-32.  
 [5] 陈长敏.高黏弹超薄磨耗层技术在福建省高速公路养护中的应用[J].福建交通科技,2020(4):14-17.  
 [6] 时敬涛,安丰伟,李纯,等.国产产成品高黏沥青的排水沥青混合料 PA-13 性能研究[J].中外公路,2020,40(4):240-243.  
 [7] O ÖZAY E. Arıkan Öztürk. Performance of modified porous asphalt mixtures[J]. Journal of the Faculty of Engineering\Architecture of Gazi University,2013,28(3):577-586.  
 [8] YAN C, HUANG W, LIN P, et al. Chemical and rheological evaluation of aging properties of high content SBS polymer modified asphalt [J].Fuel,2019,252:417-426.  
 [9] MANSOURIAN A, GOAHRI A R, KHOSROSHAHI F K. Performance evaluation of asphalt binder modified with EVA/HDPE/nanoclay based on linear and non-linear viscoelastic behaviors[J]. Construction and Building Materials, 2019,208:554-563.  
 [10] 张争奇,张英楠,黄硕磊.SBS-PU 复合改性沥青及其混合料路用性能研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(5):76-84.  
 [11] 刘斌清,吕大春,张争奇,等.高黏改性沥青高温黏弹特性指标区分度分析[J].建筑材料学报,2020,23(3):692-699.  
 [12] 孙雅珍,朱传江,吴刚兵,等.高粘弹沥青砂的粘弹性模型参数研究[J].中外公路,2015,35(4):244-247.  
 [13] 苏忠高.不同类型超薄层沥青混合料的水稳定性研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2016,35(2):40-44.  
 [14] 肖军,尹强,姜克锦,等.复掺纤维改善高黏弹改性透水沥青混合料性能试验研究[J].公路,2022(8):380-385.  
 [15] 王新科,蒋建辉,周启伟,等.一种高粘弹改性沥青及其混合料性能与工程应用[J].公路交通技术,2022,38(2):51-57.  
 [16] 郭婷婷,江凯,冯雯雯,等.不黏轮乳化沥青的制备及其作用机理研究[J].中外公路,2021,41(1):242-248.  
 [17] 王前东.调和沥青 SBS 改性效果研究[J].中外公路,2012,32(5):268-272.  
 [18] 李兆霞.损伤力学及其应用[M].北京:科学出版社,2002:33-36.  
 [19] 高胜利.温拌沥青混合料超薄罩面技术研究[D].天津:河北工业大学,2010.  
 [20] 刘少华,潘宝峰,许斌,等.透水沥青路面表面抗飞散性能提升技术研究[J].中外公路,2021,41(5):57-63.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿邮箱:cdq@smedi.com 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com