

基于平衡设计的超薄磨耗层研究与现场试验

顾建军¹,李夏^{2*},李阿坦¹,孙强²,李洁¹,江照伟²

(1.安徽省交通控股集团有限公司,安徽 合肥 230088;2.山东省交通科学研究院,山东 济南 250102)

摘要:针对超薄磨耗层在高速公路沥青路面养护工程中的应用问题,该文系统研究了基于平衡设计理念的超薄磨耗层体系,分析了改性剂的作用机理及使用特点,基于平衡设计方法设计了超薄磨耗层配比设计试验,最后根据配比设计试验选择最优的超薄磨耗层材料配比进行试验路铺筑。研究表明:直投式高黏改性剂运输、储存方便,可以提高沥青混合料的弹性恢复,减少永久变形;在级配嵌挤良好的条件下,沥青用量的合理提升,能够有效提升超薄磨耗层沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性以及水稳定性,随着改性剂掺量的提升,沥青混合料的高温稳定性逐渐提升,在沥青用量为6.8%、改性剂掺量达到0.9%时达到最优;综合考虑沥青混合料性能及经济因素,确定超薄磨耗层的最佳材料配比,并成功应用于某高速公路养护工程试验路,试验路检测结果表明超薄磨耗层具有良好的密水性、抗滑性能及降噪性能。

关键词:养护工程;超薄磨耗层;平衡设计法;高黏改性剂;抗滑;降噪

中图分类号:U414

文献标志码:A

Research and Field Test on Ultra-Thin Wearing Course Based on Balanced Design Concept

GU Jianjun¹, LI Xia^{2*}, LI Atan¹, SUN Qiang², LI Jie¹, JIANG Zhaowei²

(1.Anhui Transportation Holding Group Co., Ltd., Hefei, Anhui 230088, China;2.Shandong Transportation Research Institute, Jinan, Shandong 250102, China)

Abstract: To address the application of an ultra-thin wearing course in expressway asphalt pavement maintenance engineering, the ultra-thin wearing course system based on the balance design concept was systematically studied. In this paper, the action mechanism and application characteristics of modifiers were analyzed, and the proportion design test of the ultra-thin wearing course was designed based on the balance design method. Finally, according to the proportion design test, the optimal proportion of the ultra-thin wearing course material was selected for test road paving. Research shows that the direct-cast high viscosity modifier is convenient for transportation and storage, improves the elastic recovery of asphalt mixtures and reduces permanent deformation. Under the condition of good gradation and intercalation, a reasonable increase in asphalt dosage can effectively improve the high-temperature stability, low-temperature crack resistance, and water stability of the ultra-thin wearing course asphalt mixture. With the increase in modifier content, the high-temperature stability of the asphalt mixture is gradually improved, which reaches the optimum when the asphalt content is 6.8% and the modifier content is 0.9%. Considering the performance and economic factors of the asphalt mixture, the best material ratio of the ultra-thin wearing course is determined and successfully applied to the test road of an expressway maintenance project. The test results show that the ultra-thin wearing course provides good water tightness, anti-sliding performance, and noise reduction performance.

Keywords: maintenance engineering; ultra-thin wearing course; balanced design method; high viscosity modifier; anti-sliding; noise reduction

收稿日期:2024-03-10(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:18YFB1600103);安徽省交通控股集团科技计划项目(编号:JKKJ-2020-25)

作者简介:顾建军,男,大学本科,高级工程师.E-mail:34621248@qq.com

*通信作者:李夏,男,硕士,工程师.E-mail:906343997@qq.com

0 引言

高速公路沥青路面表面功能衰减是目前中国高速公路养护工程面临的难题^[1]。涂层类、封层类、就地热再生等预防性养护技术是有效的处理方法,但仍存在抗滑衰减快、表面脱落、施工控制难、经济性差等问题,安全性和耐久性难以保证。

超薄磨耗层技术是一种薄层罩面类养护技术,20世纪70年代,法国首次将超薄面层(BBUM)应用于高等级沥青路面上^[2-3];英、美、日、德等国家相继开展了相关研究,其中美国提出了开级配磨耗层(OGFC),并且美国科氏材料公司开发出了著名的Novachip®技术,2002年南非薄层沥青国际会议出台了相关薄面层铺设指南^[4-5];为了提升超薄磨耗层的路用性能,大量学者研究提出采用橡胶改性沥青等材料提高胶结料的黏弹性,在胶结料中添加降黏剂提高施工和易性,在混合料中添加纤维提高超薄磨耗层的强度和稳定性等^[6];国外多个国家已经铺筑了多种类型的超薄磨耗层试验路,经过长期的跟踪检测,多数路面状况良好^[7-8]。中国于20世纪90年代引入超薄磨耗层技术,但由于级配设计不合理、胶结料性能较差等原因造成实际使用效果较差;进入21世纪后中国大量学者对超薄磨耗层的材料选型、路用性能等方面开展研究,程永春等^[9]选用SBS改性沥青和硬质集料设计断级配超薄磨耗层,通过室内性能试验提出可将其应用于寒冷地区沥青路面;谭忆秋等^[10]提出以初始摆值+衰减程度作为超薄磨耗层的抗滑指标;王旭东^[11]研究认为沥青路面噪声大小的主要影响因素为混合料的粒径大小和空隙率,并设计了一种低噪声沥青混合料;黄卫东等^[12]、南雪峰等^[13]开展了超薄磨耗层抗裂性能研究,认为结合料自身性能是影响混合料抗裂性能的主要因素;兰波等^[14]、李正中等^[15]认为采用黏层同步施工超薄磨耗层是有效的预防性养护手段;石希信^[16]、赵兵^[17]、曲良辰^[18]研究认为在基质沥青或SBS改性沥青中添加高黏弹改性剂能够进一步提高沥青的高温性能。

目前超薄磨耗层已在中国多个省份进行了验证应用,在使用过程中出现了不同程度的车辙、掉粒、脱落、抗滑衰减等问题,并且常规的SBS改性沥青不能满足超薄磨耗层沥青混合料性能要求。本文以直投法高黏改性剂、SBS沥青、玄武岩等为原材料,采

用沥青混合料平衡设计方法,即综合考虑超薄磨耗层沥青混合料的高温性能、低温性能及水稳定性,最终提出超薄磨耗层最佳级配、沥青用量及改性剂掺量,应用于某高速公路预防性养护工程现场试验,现场施工效果及现场检测效果表明:基于平衡设计理念的超薄磨耗层效果良好。

1 改性剂作用机理

高黏改性剂的改性机理主要为物理改性,改性剂添加到沥青中后会发生溶胀,使沥青中的重质组分增加,针入度降低、软化点及黏度增加;在拌和过程中,高黏改性剂中的聚合物拉丝成纤维状并形成网络结构,对混合料起到加筋补强作用;高黏改性剂在高温状态下会均匀地包裹在集料表面,温度降低后,混合料将处于一定程度的弹性状态并具有较高的强度,减少永久变形^[19-20]。将高黏改性剂用于超薄磨耗层沥青混合料中,可改善其高低温性能和水稳定性。

本文选用的超薄磨耗层结合料改性剂为直投式改性剂,改性剂的组成成分为多种聚合物,如图1所示。工程中应用的特殊改性沥青一般存在制作工艺复杂、运输储存难度大,极易发生离析、性能指标降低等问题;直投式改性剂运输储存方便,应用时在拌和过程中与其他材料混合,保证了沥青混合料的性能。



图1 高黏改性剂

Figure 1 High viscosity modifier

2 原材料

2.1 集料

超薄磨耗层位于道路表面,暴露在外界环境中,直接承受车辆荷载与磨耗,因此集料宜采用坚硬、抗磨耗材料,本文采用玄武岩作为超薄磨耗层集料,填料采用矿粉,具体技术要求符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)^[21](以下简称《技术规

范》),材料筛分、密度结果见表1、2。

表1 筛分结果

Table 1 Screening results								
集料	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%							
规格	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
3~5	100	88.2	8.5	4.1	4.1	4.1	4.1	2.1
0~3	100	99.5	63.8	38.8	21.3	15.7	11.3	9.1
矿粉	100	100	100	100	100	100	92.7	79.1

表2 密度结果

Table 2 Density results			
集料规格/mm	表观相对密度	毛体积相对密度	吸水率/%
3~5	2.898	2.801	1.20
0~3	2.755	2.658	1.32
矿粉	2.688	—	—

2.2 沥青胶结料

本文超薄磨耗层所用SBS改性沥青相关技术检测结果见表3。

表3 SBS改性沥青技术指标检测结果
Table 3 Test results of technical indexes of SBS modified asphalt

检测指标	单位	检测结果
25℃针入度	0.1 mm	51
5℃延度	cm	28
软化点(R&B)	℃	86
135℃运动黏度	Pa·s	2.4
闪点	℃	273
溶解度	%	99.7
弹性恢复(25℃)	%	87.2
储存稳定性	℃	1.8
TFOT 质量变化	%	0.28
(或 RTFOT) 针入度比(25℃)	%	71
后残留物 延度(5℃)	cm	19

2.3 改性剂

本文超薄磨耗层所用结合料改性剂相关技术指标检测结果见表4。

表4 改性剂技术指标检测结果
Table 4 Test results of modifier technical indicators

指标	单位	检测结果
外观		乳白色,米粒状
熔融指数(140℃,2.16 kg)	g/10 min	6.1
熔点	℃	84
15℃密度	g/cm ³	1.1

3 超薄磨耗层平衡设计

因超薄磨耗层原材料、级配以及性能要求的特殊性,采用常规的马歇尔设计法仅满足体积指标,高低温性能、水稳定性等沥青混合料路用性能指标往往不满足要求。因此本文超薄磨耗层沥青混合料采用平衡设计方法,通过路用性能试验指标确定最佳沥青用量及改性剂掺量。

3.1 级配设计

超薄磨耗层设计施工厚度较薄,沥青混合料最大公称粒径为4.75 mm,为保证沥青混合料高温稳定性,本文考虑提高粗集料用量,并通过添加高掺量的矿粉、沥青和木质素纤维形成沥青玛蹄脂填充空隙,从而保证沥青混合料的密水性能,经过前期预备试验确定了超薄磨耗层的级配组成,如表5所示。

表5 级配组成
Table 5 Gradation composition

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
9.5	100.0	0.6	17.6
4.75	93.5	0.3	15.7
2.36	34.2	0.15	13.6
1.18	23.6	0.075	10.5

3.2 沥青用量设计

根据级配设计结果,预估纤维掺量0.3%、改性剂掺量0.6%,分别采用6.4%、6.6%、6.8%、7.0%和7.2%共5个沥青用量进行马歇尔试验,基于马歇尔试验分别进行车辙试验、冻融劈裂试验、低温弯曲试验和汉堡车辙试验,根据性能指标优选最佳沥青用量;相关试验方法参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)^[22]。马歇尔试验结果见表6。

表6 马歇尔试验结果
Table 6 Results of Marshall test

沥青用量/ %	理论最大相对 密度γ _t	试件毛体积相对 密度γ _f	空隙率/ %
6.4	2.522	2.388	5.3
6.6	2.514	2.399	4.6
6.8	2.506	2.411	3.8
7.0	2.499	2.421	3.1
7.2	2.491	2.424	2.7

根据马歇尔试验提供的密度数据,分别进行了车辙试验和低温弯曲试验,部分试验试件如图2所示,试验结果如图3所示。沥青用量由6.4%增加到7.2%,低温破坏应变由1 895 $\mu\epsilon$ 增加到2 936 $\mu\epsilon$,沥青混合料低温性能逐渐提升;动稳定度存在明显的峰值,最高达到2 715次/mm,沥青用量大于6.8%后,沥青混合料中的自由沥青过多,导致沥青混合料高温抗车辙性能下降,因此优选沥青用量为6.9%左右。



图2 车辙试验试件

Figure 2 Rutting test specimen

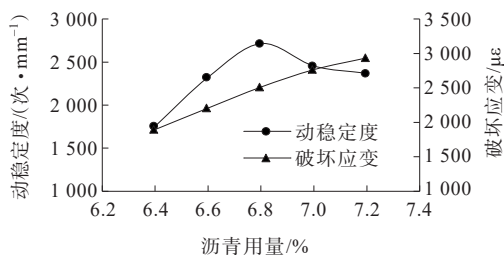


图3 车辙试验和低温弯曲试验结果

Figure 3 Results of rutting test and low-temperature bending test

冻融劈裂试验结果如图4所示。随着沥青用量的增加,冻融劈裂强度比由78.2%增加至94.1%,超薄磨耗层沥青混合料水稳定性能逐渐提升,但沥青用量大于6.8%后,冻融劈裂强度比增长幅度趋于平缓,基于经济成本因素考虑,优选沥青用量为6.8%左右。

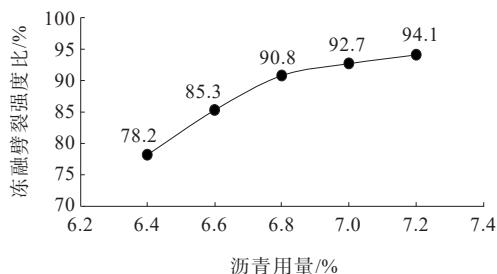


图4 冻融劈裂试验结果

Figure 4 Results of freeze-thaw splitting test

本文采用汉堡车辙试验综合验证超薄磨耗层沥青混合料的综合性能,根据马歇尔试验毛体积密度成型旋转压实试件,2个试件为一组,将试件切割后浸入50℃的水中,测试碾压20 000次时最大变形深度,试验试件如图5所示,试验结果如图6所示。由图6可知:随着沥青用量的增加,汉堡车辙深度先减小后增大,在沥青用量为6.8%左右时达到最小值11.7 mm,优选沥青用量为6.8%;图7为沥青用量为6.8%时汉堡车辙试验曲线图,图中曲线斜率未出现突然变大的情况,即未出现明显剥落变形拐点,表明沥青混合料的抗水损坏性能较好。



图5 汉堡车辙试验试件

Figure 5 Hamburg rutting test specimen

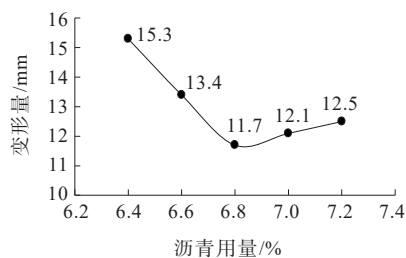


图6 汉堡车辙试验结果

Figure 6 Results of rutting test in Hamburg

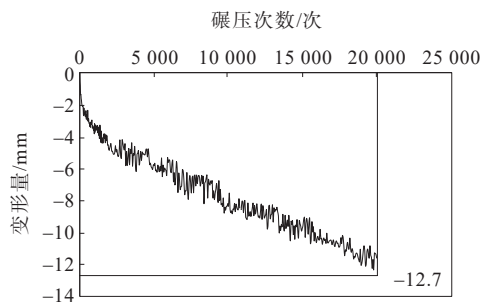


图7 汉堡车辙试验曲线图

Figure 7 Curve of rutting test in Hamburg

综上所述,结合超薄磨耗层沥青混合料各项性能指标及经济成本,确定超薄磨耗层沥青混合料最佳沥青用量为6.8%。但根据《技术规范》对于改性沥青 SMA 混合料动稳定度大于3 000次/mm的要求,

本试验未达到要求,并且汉堡车辙深度较大,表明沥青混合料高温稳定性有待提升。

3.3 改性剂掺量设计

根据级配、沥青用量设计试验结果,选用改性剂掺量0、0.3%、0.6%、0.9%、1.2%进行车辙试验和汉堡车辙试验,试验结果如图8、9所示。

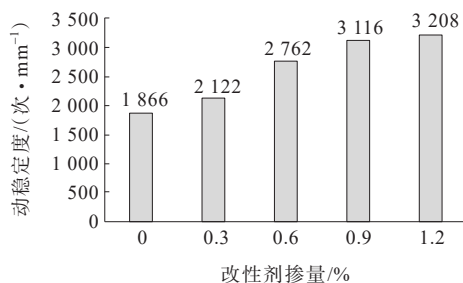


图8 车辙试验结果

Figure 8 Results of rutting test

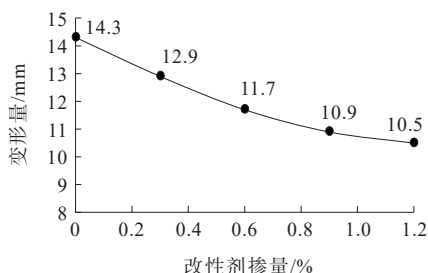


图9 汉堡车辙试验结果

Figure 9 Results of rutting test in Hamburg

由试验结果可得:当改性剂掺量不断提高,动稳定度增大,汉堡车辙深度减小,表明改性剂能够提高沥青混合料的高温稳定性,当改性剂掺量增加至0.9%时,动稳定度达到3116次/mm,汉堡车辙深度达到10.9 mm,满足相关技术规范的要求。综上所述,在考虑经济成本因素的情况下,确定最佳改性剂掺量为0.9%。

4 现场试验

4.1 工程概况

以某高速公路养护工程为背景,原沥青路面结构为4 cm SMA-13+6 cm AC-20+8 cm AC-25,现因表面功能衰减进行养护维修,维修方案之一选用超薄磨耗层。

4.2 试验设计及实施

根据超薄磨耗层平衡设计试验结果确定的级配组成,选用玄武岩作为集料,沥青用量为6.8%,改性

剂掺量为0.9%,纤维掺量为0.3%。超薄磨耗层试验段长度为500 m,设计铺设厚度为15 mm,先将路表标志标线进行清理,然后喷洒不黏轮乳化沥青黏层,最后加铺超薄磨耗层,如图10所示。



图10 现场施工

Figure10 Site construction

4.3 现场检测及数据分析

试验段总长500 m,以100 m为一个断面进行现场检测。超薄磨耗层试验段厚度通过现场取芯检测,结果均值为15.5 mm;渗水系数试验检测结果为不渗水,密水性能良好,满足设计要求,实际施工效果如图11所示。



图11 施工效果

Figure 11 Construction effect

超薄磨耗层的抗滑性能采用人工铺砂试验、摆式摩擦试验和动态摩擦试验进行检测,并与原路面进行对比分析,试验结果见表7。原路面构造深度要大于超薄磨耗层,因超薄磨耗层沥青混合料的公称最大粒径为4.75 mm,摊铺碾压后构造深度较小,构造深度为0.74 mm左右;但超薄磨耗层的摆值和动态摩擦试验结果要优于原路面,原路面经过长期服役,表面沥青膜脱落严重,本试验超薄磨耗层为骨架密实型沥青混合料,沥青膜厚度相对较厚,表面接触面积对抗滑性能起主导作用,摆值结果在62左右,动态摩擦系数为0.41左右,表明超薄磨耗层能够提升路面的抗滑性能。

对超薄磨耗层、原路面以及相邻超表处试验段进行行车噪声检测。试验采用某国产SUV汽车进行

车内噪声检测,行车速度为 80 km/h,未剔除车辆本身噪声,检测结果见图 12。超薄磨耗层的车内噪声仅为 73.48 dB,较原路面降低了 6.46 dB,比超表处低 5.18 dB,表明超薄磨耗层能够显著提升行车舒适性。

表 7 抗滑性能检测结果

Table 7 Test results of anti-sliding performance

检测断面	构造深度/mm	摆值/BPN	动态摩擦系数
原路面	1.30	52	0.34
1#	0.75	63	0.41
2#	0.66	62	0.41
3#	0.82	62	0.39
4#	0.76	63	0.42
5#	0.73	61	0.41

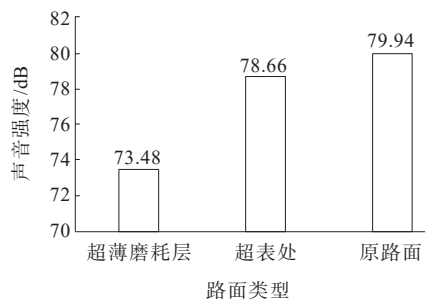


图 12 路面噪声检测结果

Figure 12 Results of pavement noise test

5 结论

本文系统研究了基于平衡设计理念的超薄磨耗层体系,分析了高黏改性剂的作用机理,通过平衡设计方法研究得出超薄磨耗层的最佳材料配比,最终成功应用于某高速公路养护工程。所得结论如下:

(1) 高黏改性剂运输储存方便,采用直投式拌和方法,保证了沥青混合料的性能;高黏改性剂的添加大幅度提高了超薄磨耗层沥青混合料的高温抗车辙和抗水损害能力,并且提高沥青混合料的弹性恢复,减少永久变形。

(2) 超薄磨耗层配比平衡设计试验结果表明:在级配嵌挤良好的情况下,适当提升沥青用量,能够提升超薄磨耗层沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性;在综合考虑沥青混合料性能和经济因素的条件下,确定了本试验的最佳级配组成、沥青用量为 6.8%,改性剂掺量为 0.9%,纤维掺量为 0.3%。在实际超薄磨耗层应用中,根据工程要求应选择动稳定度大于 3 000 次/mm、低温破坏应变大于 2 500 $\mu\epsilon$ 、冻融强度劈裂比大于 90%、汉堡车辙深度

小于 12 mm 的材料配比。

(3) 针对某高速公路沥青路面养护工程,在喷洒不黏轮乳化沥青后施工超薄磨耗层;施工完毕后对厚度、渗水性能、抗滑性能、行车降噪性能进行检测,检测结果表明超薄磨耗层满足高速公路养护工程表面功能恢复的要求,密水性能、抗滑性能、降噪性能良好。

本研究将在后续工作过程中对超薄磨耗层试验路进行跟踪观测,定期观测试验路的抗滑指标、平整度、车辙、裂缝发展和颗粒脱落等情况,以分析验证其路用耐久性。

参考文献:

References:

- [1] 崔新壮,黄丹,刘磊,等.沥青路面病害力学研究进展[J].山东大学学报(工学版),2016,46(5):68-87.
CUI Xinzhuang, HUANG Dan, LIU Lei, et al. A review of mechanics of asphalt pavement disease[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2016, 46(5): 68-87.
- [2] 杨晓华,袁战文,温勇兵,等.沥青路面磨耗层与下卧层组合结构力学行为分析[J].中外公路,2024,44(1):40-47.
YANG Xiaohua, YUAN Zhanwen, WEN Yongbing, et al. Mechanical behavior of composite structures of wearing course and underlying layer for asphalt pavements[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(1): 40-47.
- [3] JIM C. The design and performance of thin surfacing layers [C]//International Flexible Pavements Conferences: Mdboume Australia, 2003.
- [4] KANDHAL P S, LOCKETT L. Construction and performance of ultrathin asphalt friction course[C]//Flexible Pavement Rehabilitation and Maintenance. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959:ASTM International, 2009.
- [5] 张兵. 稳定型橡胶改性沥青超薄磨耗层的应用研究[D]. 西安:长安大学, 2019.
ZHANG Bing. A study on the application of stabilized rubber modified asphalt ultra-thin wearing course[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [6] XU O M, XIAO F P, HAN S, et al. High temperature rheological properties of crumb rubber modified asphalt binders with various modifiers[J]. Construction and Building Materials, 2016, 112: 49-58.
- [7] AASHTO. Standard practice for designing stone matrix

- asphalt (SMA)[S],1998.
- [8] 沙庆林.多碎石沥青混凝土 SAC 系列的设计与施工[M].北京:人民交通出版社,2005.
- SHA Qinglin.The design and construction of the series of stone asphalt concrete SAC[M]. Beijing: China Communications Press,2005.
- [9] 程永春,付极,刘寒冰,等.超薄磨耗层沥青混合料路用性能试验研究[J].公路,2008,53(3):13-16.
- CHENG Yongchun,FU Ji,LIU Hanbing,et al.Experiment and study on road performance of asphalt mixture of ultra-thin wearing layer[J].Highway,2008,53(3):13-16.
- [10] 谭忆秋,姚李,王海朋,等.超薄磨耗层沥青混合料评价指标[J].哈尔滨工业大学学报,2012,44(12):73-77.
- TAN Yiqiu,YAO Li,WANG Haipeng,et al.Performance evaluation indicator of ultra-thin wearing course asphalt mixture[J].Journal of Harbin Institute of Technology,2012,44(12):73-77.
- [11] 王旭东.低噪声沥青路面结构设计研究[J].公路交通科技,2003,20(1):33-37.
- WANG Xudong. Research of the low-noise asphalt pavement design[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development,2003,20(1):33-37.
- [12] 黄卫东,张家伟,吕泉,等.基于间接拉伸开裂方法评价超薄磨耗层混合料抗裂性能[J].同济大学学报(自然科学版),2020,48(11):1588-1594.
- HUANG Weidong,ZHANG Jiawei,LYU Quan,et al.Evaluation of cracking performance of ultra-thin friction course mixture based on indirect tensile asphalt cracking test[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020,48(11):1588-1594.
- [13] 南雪峰,田泽峰.超薄磨耗层层间抗剪强度试验研究[J].公路,2010,55(12):167-171.
- NAN Xuefeng,TIAN Zefeng.Experimental study on shear strength between ultra-thin wear layers[J].Highway,2010,55(12):167-171.
- [14] 兰波,高源.快速同步施工型超薄沥青磨耗层层间黏结强度试验分析[J].中外公路,2020,40(6):296-299.
- LAN Bo,GAO Yuan.Test analysis of bonding strength between wear layers of ultra-thin asphalt under rapid synchronous construction[J].Journal of China & Foreign Highway,2020,40(6):296-299.
- [15] 李正中,柴东然,耿磊,等.密级配抗滑超薄磨耗层材料 UWM-10 设计与路用性能研究[J].中外公路,2019,39(1):243-248.
- LI Zhengzhong,CHAI Dongran,GENG Lei,et al.Design and performance investigation on UWM-10 dense graded anti-sliding ultra-thin wearing course material[J]. Journal of China & Foreign Highway,2019,39(1):243-248.
- [16] 石希信.Honeywell TitanTM 聚合物改性沥青与常用改性沥青高温性能的对比研究[D].成都:西南交通大学,2020.
- SHI Xixin. Comparative study on high temperature performance of Honeywell TitanTM polymer modified asphalt and commonly used modified asphalt[D].Chengdu: Southwest Jiaotong University,2020.
- [17] 赵兵.高粘弹沥青结合料的高温性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.
- ZHAO Bing.Study on the high temperature performance of high viscoelastic asphalt binder[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2016.
- [18] 曲良辰.超薄磨耗层高粘高弹改性沥青的制备及性能研究[D].长沙:长沙理工大学,2018.
- QU Liangchen. Study on preparation and properties of ultra-thin wear-resistant high-viscosity and high-elasticity modified asphalt[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology,2018.
- [19] 王劲松.掺 RST-P 型高粘改性剂的微表处抗磨耗性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2018.
- WEN Jinsong. Study on wear resistance of RST-P type high viscosity modifier at micro-surface[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2018.
- [20] 刘博.高粘改性剂在排水沥青混合料中的应用研究[D].大连:大连理工大学,2016.
- LIU Bo. Study on the application of high viscosity modifier in porous asphalt mixture[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2016.
- [21] 交通部公路科学研究所.公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004[S].北京:人民交通出版社,2004.
- Research Institute of Highway Ministry of Transport. Technical specifications for construction of highway asphalt pavements: JTG F40—2004[S]. Beijing: China Communications Press,2004.
- [22] 交通运输部公路科学研究院.公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- Research Institute of Highway Ministry of Transport. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011[S]. Beijing:China Communications Press,2011.