

蓖麻油生物沥青调和沥青混合料使用性能研究*

曾梦澜[†], 田伟, 朱艳贵, 李君峰
(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:为了评价蓖麻油生物沥青调和沥青混合料的使用性能,设计了具有5种蓖麻油生物沥青掺量且级配均为AC-20C的沥青混合料,根据各掺量最佳油石比制作试件并进行混合料使用性能试验.根据试验结果分析了不同掺量调和沥青混合料的高温稳定性、水稳定性、低温抗裂性、路面设计参数等性能指标.分析表明,随着生物沥青掺量的增加,调和沥青混合料的高温稳定性、水稳定性、抗压回弹模量逐渐降低,但在一定掺量范围内满足JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》的要求,此外水稳定性在加入消石灰后得到显著改善.随着生物沥青掺量的增加,劈裂抗拉强度降低至一谷值后略有提高,低温抗裂性得到改善.由此可见,将蓖麻油生物沥青调和沥青替代石油沥青用于混合料,在一定掺量范围内是可行的.

关键词:道路工程;生物沥青;沥青混合料;使用性能;试验研究

中图分类号:U414

文献标志码:A

Study on Performance of Castor Oil-based Bioasphalt Blended Asphalt Mixture

ZENG Menglan[†], TIAN Wei, ZHU Yangui, LI Junfeng
(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to investigate the performance of castor oil-based bioasphalt blended asphalt mixture, design of AC-20C blended asphalt mixture with 5 different percentages of bioasphalt was conducted. Performance tests were then carried out on the specimens with optimum asphalt contents of respective percentages of bioasphalt. Based on the test results, the properties such as high temperature stability, moisture damage resistance, low temperature cracking resistance, and pavement structure design parameters were analyzed. The analyses indicate that with increasing percentage of bioasphalt, the high temperature stability, moisture damage resistance and compressive resilient modulus of the blended asphalt mixture decrease, but they satisfy the requirements of JTG F40-2004 within a certain range of percentage. The moisture damage resistance is significantly improved by adding hydrated lime. With increasing percentage of bioasphalt, the indirect tensile strength of the blended asphalt mixture decreases to the minimum value and then increases slightly, while the low temperature cracking resistance of the blended asphalt mixture increases. Hence, the use of castor oil-based bioasphalt as partial replacement to petroleum based asphalt in asphalt mixture is feasible.

* 收稿日期:2016-07-30

基金项目:湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目(201110),2011 Advance and Innovation Project in Science and Technology, Hunan Department of Transportation(201110)

作者简介:曾梦澜(1954—),男,湖南汉寿人,湖南大学教授,博士生导师

[†] 通讯联系人, E-mail: menglanzeng@hnu.edu.cn

Key words: road engineering; bioasphalt; asphalt mixture; performance; experimental study

随着道路交通量及道路里程的持续增加与石油资源的日渐枯竭,寻找可再生资源来替代石油沥青已经提上议事日程。

生物沥青,作为一种可再生资源,来自于一些生物质材料,比如动物粪便、农作物秸秆、植物油废料等,通过酸化、水解、分馏和氧化等一系列物理化学工艺即可制得生物沥青^[1]。生物沥青具有可再生、环保无污染以及价格低廉等特点。另一方面,如果能够用生物沥青部分替代并改性石油沥青,不仅对生态环境起到了保护作用,也将促进沥青路面服务水平和使用寿命的提高。国外学者对生物沥青混合料进行了广泛的研究,Wen等人^[2-5]分别研究了由废弃餐饮油、松木木屑、废弃木材加工而成的生物沥青的混合料性能。Hajj等^[6]评估了生物沥青的加入对再生沥青混合料(RAP)性能的影响。Williams等^[7]铺筑试验路并将相关技术申请了专利。国内研究尚处于起步阶段,一般研究集中在结合料的物理和化学特性^[8],对混合料的研究和实际应用甚少。孙朝杰等^[9-11]对生物沥青混合料使用性能的研究,取得了一定进展。

生物沥青来源种类较多,性能差异大,对不同来源的生物沥青进行沥青混合料研究,有助于对生物沥青应用的拓展。本文作者与潘浩志等此前通过实验室试验,以蓖麻油生物沥青作为改性剂,将其以不同比例加入基质石油沥青,进行了结合料研究并取得了一定成果^[12-13],现在继续进行混合料研究,探讨蓖麻油植物沥青对沥青混合料使用性能的影响。

1 试验材料

1.1 原材料

基质沥青采用50号A级道路石油沥青,基质沥青的技术指标、技术要求和试验结果见表1,其技术指标的试验结果均满足JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》^[14]的技术要求。

生物沥青采用河北省南宫市晟邦生物科技有限公司提供的蓖麻油植物沥青,其原料为蓖麻子,由炼制蓖麻油后残余的下脚油再经过蒸馏、氧化等物理化学工艺处理,最后得到的废料即为植物沥青。这种蓖麻油植物沥青在常温条件下为黑色固体,与

传统石油沥青基本一致,只在颜色上稍显偏淡^[12]。生物沥青技术指标和试验结果见表2。

表1 基质沥青技术指标

Tab.1 Technical properties of asphalt binder

技术指标	技术要求	试验结果
针入度(25℃,5s,100g)/(0.1mm)	40~60	43.7
针入度指数PI	-1.5~+1.0	-0.66
软化点/℃	≥49	52.8
延度(15℃)/cm	≥80	>100
闪点/℃	≥260	270
溶解度/%	≥99.5	99.6
密度(15℃)/(g·cm ⁻³)	实测	1.040
质量变化/%	≤±0.8	0.02
RTFOT后 残留针入度比(25℃)/%	≥63	63.6
残留延度(15℃)/cm	≥10	13.5

表2 生物沥青技术指标

Tab.2 Technical properties of bioasphalt

技术指标	三氯乙烯溶解度/%	密度(15℃)/(g·cm ⁻³)	闪点/℃
试验结果	87.5	0.990	240

本研究所采用的粗细集料均为石灰岩,填料为石灰岩矿粉,其主要技术指标的试验结果均满足JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》的技术要求。

1.2 调和沥青的制备

调和沥青制备时,先将基质沥青和生物沥青加热到105℃,然后按照预定的比例混合,在搅拌机中以1500r/min的转速搅拌20min。生物沥青加入量分别为沥青总量的0%,5%,10%,15%,20%。其中,基质沥青采用相同的加工过程,得到作为特例的零含量生物沥青调和沥青。

2 混合料设计与使用性能试验

2.1 混合料设计

本研究按JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》进行混合料设计,以5种不同掺量的生物沥青调和沥青为结合料,与同级配的集料制备成AC-20C沥青混合料,集料级配组成见表3。

利用5种不同掺量生物沥青调和沥青的粘温曲线,确定不同混合料的拌和与压实温度^[15]。

根据马歇尔配合比设计方法得到生物沥青掺量分别为0%,5%,10%,15%和20%的沥青混合料的最佳沥青含量分别为4.5%,4.6%,4.7%,4.9%

和 5.0%。

表 3 AC-20C 沥青混合料的集料级配组成

Tab.3 Gradation of AC-20C asphalt mixture aggregates

筛孔尺寸/mm	通过不同尺寸筛孔的质量百分率/%		
	级配上限	级配下限	合成级配
26.5	100	100	100.0
19	100	90	97.0
16	92	78	85.0
13.2	80	62	73.0
9.5	72	50	61.0
4.75	56	26	33.5
2.36	44	16	23.5
1.18	33	12	17.0
0.6	24	8	12.1
0.3	17	5	7.9
0.15	13	4	5.2
0.075	7	3	4.0

不同掺量生物沥青调和沥青混合料的马歇尔试验的稳定度、流值、马歇尔模数见图 1。从图 1 可以看出,随着生物沥青掺量的增加,沥青混合料的稳定度逐渐减小,流值逐渐增大,马歇尔模数逐渐减小。

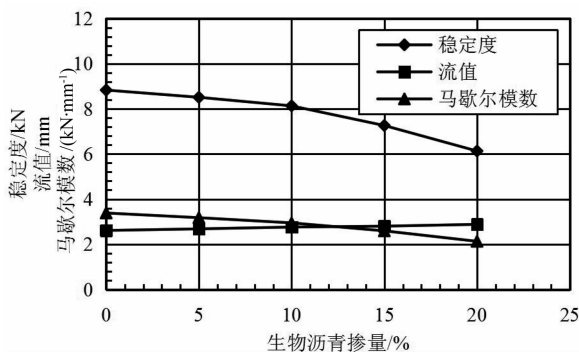


图 1 不同掺量调沥青混合料的马歇尔试验指标

Fig.1 Marshall properties of bioasphalt blended mixture in different content

2.2 混合料使用性能试验

根据已经确定的最佳沥青含量制作混合料试件并进行使用性能试验。按 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[16]进行车辙试验(T0719—2011)、马歇尔试验与浸水马歇尔试验(T0709—2011)、冻融劈裂试验(T0729—2000)、弯曲试验(T0715—2011)、单轴压缩试验(T0713—2000)、劈裂试验(T0716—2011)。

3 试验结果分析

3.1 高温稳定性

沥青路面高温稳定性是指沥青混合料在荷载

作用下抵抗永久变形的能力。沥青路面产生的推移、拥包、搓板、车辙、泛油等损坏形式都是沥青混合料高温稳定性较差的结果^[17]。车辙试验结果可以评价沥青混合料高温稳定性。

不同掺量生物沥青调和沥青混合料的车辙试验动稳定度见图 2。从图 2 可以看出,沥青混合料的动稳定度随着生物沥青掺量的增加而逐渐降低,且降幅明显。掺量分别为 0%,5%,10%,15%,20%的沥青混合料的动稳定度分别为 3 316,2 404,1 320,787 和 492 次/mm。与基质沥青混合料相比,调和沥青混合料的动稳定度分别减少了 27.5%,60.2%,76.3%和 85.2%。说明生物沥青的掺入降低了混合料抵抗车辙的能力,但是当生物沥青掺量小于 12%时满足夏炎热区的相应要求^[14]。

综上所述,生物沥青的掺入降低了沥青混合料的高温承载能力和抵抗变形能力。但是,当生物沥青掺量小于 12%时满足夏炎热区的相应要求。

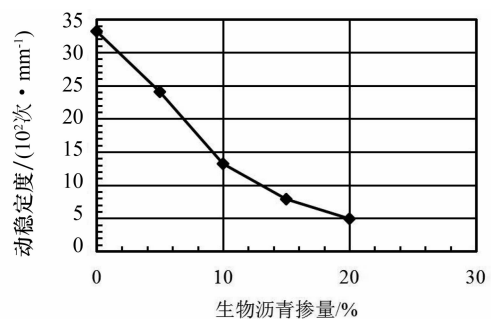


图 2 不同掺量调沥青混合料的动稳定度

Fig.2 Dynamic stability of bioasphalt blended mixture in different content

3.2 水稳定性

水损害是指进入路面孔隙中的水不断产生动水压力或真空负压抽吸的反复循环作用,水分逐渐渗入沥青与集料的界面上,使沥青黏附性降低,沥青混合料产生掉粒、松散,继而形成坑槽、推挤变形等损坏现象^[18]。沥青混合料的水稳定性是指其抵抗水损害的能力。浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验结果可以评价沥青混合料水稳定性。

不同掺量生物沥青调和沥青混合料的水稳定性试验结果见图 3 和图 4。从图 3 和图 4 可以看出,随着生物沥青掺量的增加,集料与沥青的粘附性迅速下降,进而使水稳定性显著降低。为了改善水稳定性,以消石灰抗剥落剂替代矿粉,生物沥青掺量分别为 5%,10%,15%,20%的调和沥青混合料的浸水残留稳定度从基质沥青混合料的 98.4%分别降低到 95.1%,88.2%,67.8%,46.7%。此外,调和沥青

混合料的冻融劈裂残留强度比也逐渐降低,生物沥青掺量分别为 5%,10%,15%,20%的调和沥青混合料的冻融劈裂残留强度比从基质沥青混合料的 96.2%分别降低到 92.4%,76.4%,63.2%,58.6%。从图 3 和图 4 可以看出,在加入消石灰抗剥落剂后,浸水残留稳定度与冻融劈裂残留强度比有显著提升,而且当生物沥青掺量小于 12%时满足潮湿区的相应要求^[14]。

综上所述,当生物沥青掺入过多时,集料和沥青的黏附性和抗剥离性显著降低,混合料的抗水损害能力明显下降。但是,当加入消石灰抗剥落剂后,水稳定性明显改善。当生物沥青掺量小于 12%时满足潮湿区的相应要求。

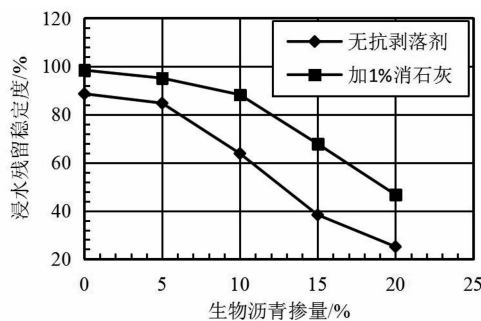


图 3 不同掺量调和沥青混合料的浸水残留稳定度
Fig.3 Retained marshall stability of bioasphalt blended mixture in different content

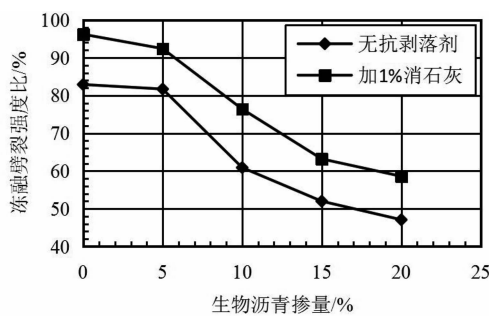


图 4 不同掺量调和沥青混合料的冻融劈裂强度比
Fig.4 Indirect tensile strength ratio of bioasphalt blended mixture in different content

3.3 低温抗裂性

低温对沥青混合料强度的影响主要是影响其抗拉强度和变形能力,从而造成低温开裂^[17]。沥青混合料弯曲试验结果可以评价沥青混合料低温抗裂性。

不同掺量生物沥青调和沥青混合料的低温破坏弯拉应变见图 5。从图 5 可以看出,低温破坏弯拉应变随着生物沥青的掺量的增加而增大,生物沥青掺量分别为 5%,10%,15%,20%的调和沥青混合

料的破坏弯拉应变由基质沥青混合料的 2 172 $\mu\epsilon$ 分别增大到 2 228,2 695,2 796 和 2 818 $\mu\epsilon$,增涨幅度分别为 2.6%,24.1%,28.7%,29.7%。而沥青混合料的低温弯拉劲度模量随着生物沥青掺量的增加而逐渐降低,由基质沥青混合料的 3 766.91 MPa 分别降低到 3 573.32,3 235.72,2 871.64,2 477.3 MPa。

综上所述,生物沥青调和沥青混合料的低温抗裂性能随生物沥青掺量增加而逐渐改善,不仅满足规范要求,而且有较多盈余^[14]。

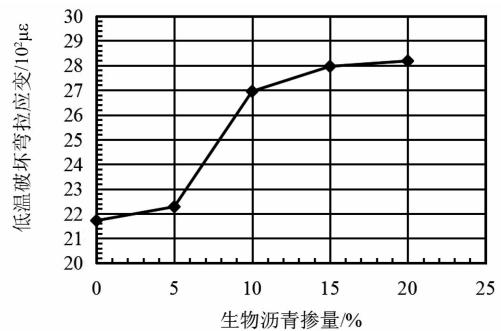


图 5 不同掺量调和沥青混合料的低温破坏弯拉应变
Fig.5 Low temperature flexural tensile strain of bioasphalt blended mixture in different content

3.4 路面设计参数

我国沥青路面结构设计方法采用双圆垂直均布荷载作用下的层状弹性体系理论,以路表回弹弯沉值和结构层底拉应力为设计指标进行路面结构厚度设计^[19]。计算路表回弹弯沉值时,以抗压回弹模量为设计参数,沥青混合料的试验温度为 20 $^{\circ}\text{C}$;计算路面材料层底拉应力时,以抗压回弹模量和劈裂强度为设计参数,沥青混合料的试验温度为 15 $^{\circ}\text{C}$ 。

不同掺量生物沥青调和沥青混合料的单轴压缩试验结果见表 4 和表 5。从表 4 和表 5 可以看出,随着生物沥青掺量的增加,沥青混合料在两个不同温度下抗压强度均逐渐降低后略有提高,抗压回弹模量随着生物沥青掺量的增加而降低。

表 4 沥青混合料 15 $^{\circ}\text{C}$ 单轴压缩试验结果

Tab.4 Results of compression tests at 15 $^{\circ}\text{C}$ for asphalt mixture

掺量/%	抗压强度 R_c /MPa	抗压回弹模量 E /MPa	
		保证率 95%	保证率 90%
0	3.70	2 093	2 150
5	3.08	1 834	1 881
10	2.90	1 439	1 555
15	3.04	1 154	1 313
20	3.14	980	1 143

表 5 沥青混合料 20 °C 单轴压缩试验结果
Tab.5 Results of compression tests at 20 °C
for asphalt mixture

掺量/%	抗压强度 R_c /MPa	抗压回弹模量 E /MPa	
		保证率 95%	保证率 90%
0	3.52	1 676	1 775
5	2.26	1 304	1 455
10	2.02	948	1 089
15	2.14	833	971
20	2.38	761	888

不同掺量生物沥青调和沥青混合料的劈裂试验结果见表 6。从表 6 可以看出,随着生物沥青掺量的增加,沥青混合料的 15 °C 劈裂强度逐渐降低后又略有提高,生物沥青掺量分别为 5%, 10%, 15%, 20% 的调和沥青混合料的劈裂强度与基质沥青混合料相比分别降低了 0.188, 0.828, 0.767, 0.721 MPa。15 °C 劈裂破坏拉伸应变随着生物沥青的掺量的增加呈现出先增后减趋势,破坏劲度模量随生物沥青掺量的增加呈现出先减后增的趋势。

表 6 沥青混合料 15 °C 劈裂试验结果
Tab.6 Results of splitting tests at 15 °C for asphalt mixture

掺量/%	劈裂强度 R_T /MPa	破坏应变 $\epsilon_T/\mu\epsilon$	破坏劲度模量 S_T /MPa
0	2.419	10 000	374
5	2.231	10 300	373
10	1.591	11 333	301
15	1.652	10 200	340
20	1.698	9 000	362

综上所述,生物沥青调和沥青的刚度和强度整体趋势均有所下降,抵抗变形和荷载的能力降低。

3.5 生物沥青使用建议与推荐掺量范围

此前研究表明,因蓖麻油生物沥青有稀释作用,蓖麻油生物沥青掺量每增加 10%, 针入度 (25 °C, 5 s, 100 g) 约增加 20 (0.1 mm)^[12], 稠度变化是引起性能下降的主要原因。因此建议选用针入度较低的基质沥青使调和后的针入度满足使用要求,从而改善高温性能,并加入抗剥落剂改善水稳定性。

本文所研究的蓖麻油生物沥青调和沥青混合料不针对特定的使用地区,但为推荐蓖麻油生物沥青的最佳掺量范围,假定使用地为夏炎热冬温潮湿区。根据 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》^[14],推荐蓖麻油生物沥青掺量的上限为 12%。对

于夏热冬温半干区,蓖麻油生物沥青的最佳掺量范围的上限可进一步放宽。

4 结 论

为研究蓖麻油生物沥青调和沥青混合料的使用性能,首先制备了最大掺量为 20% 的生物沥青调和沥青,然后进行了 AC-20C 不同掺量调和沥青混合料配合比设计,再根据各掺量最佳沥青含量制作试件并进行混合料使用性能试验。根据试验结果分析了不同掺量调和沥青混合料的马歇尔稳定度、流值、马歇尔模数、动稳定度、浸水残留稳定度、冻融劈裂残留强度比、弯拉应变、破坏劲度模量、15 °C 和 20 °C 抗压回弹模量、15 °C 劈裂强度等技术参数,评价了蓖麻油生物沥青调和沥青混合料的高温稳定性、水稳定性、低温抗裂性、刚度和强度。试验结果分析表明:

1) 随着生物沥青掺量的增加,沥青混合料的动稳定度逐渐减小,说明生物沥青的掺入降低了沥青混合料的高温稳定性,但是当生物沥青掺量小于 12% 时满足夏炎热区的相应要求。

2) 沥青混合料的浸水马歇尔残留稳定度和冻融劈裂残留强度比均随着生物沥青掺量的增加而降低。说明生物沥青的掺入降低了沥青混合料的水稳定性。但是当加入消石灰抗剥落剂后,水稳定性明显改善,当生物沥青掺量小于 12% 时满足潮湿区的相应要求。

3) 沥青混合料的低温弯拉破坏应变随生物沥青掺量的增加而增大。说明生物沥青调和沥青混合料的低温抗裂性能随生物沥青掺量增加而逐渐改善,不仅满足规范要求,而且有较多盈余。

4) 沥青混合料的抗压回弹模量随生物沥青掺量的增加而降低。说明生物沥青的掺入降低了沥青混合料的刚度和抗变形能力。沥青混合料的劈裂强度随生物沥青掺量的增加而呈现出先减小后增大的趋势,但是相比基质沥青混合料均有降低。说明生物沥青的掺入降低了混合料的强度和抵抗荷载的能力。

5) 生物沥青的加入虽然在一定程度上降低了混合料的高温性能和水稳定性,但是低温性能得到显著改善,因此建议选用针入度较低的基质沥青改善高温性能并加入消石灰抗剥落剂改善水稳定性。综合考虑调和沥青混合料的高温稳定性、水稳定性和低温抗裂性等指标,在夏炎热冬温潮湿区,推荐

生物沥青的掺量上限为 12%。在夏热冬温半干区,生物沥青的掺量上限可进一步放宽。

参考文献

- [1] 汪海年,高俊锋,尤占平,等. 路用生物沥青研究进展[J]. 武汉理工大学学报,2014,36(7):55-60.
WANG Hainian, GAO Junfeng, YOU Zhanping, *et al.* Advances in bio-binder application on road pavement [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(7): 55-60. (In Chinese)
- [2] WEN H, BHUSAL S, WEN B. Laboratory evaluation of waste cooking oil-based bioasphalt as an alternative binder for hot mix asphalt[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(10): 1432-1437.
- [3] COOPER S B, MOHAMMAD L N, ELSEIFI M A. Evaluation of asphalt mixtures containing renewable binder technologies [J]. International Journal of Pavement Research & Technology, 2013, 6(5): 570-575.
- [4] MOHAMMAD L N, ELSEIFI M A, COOPER S B, *et al.* Laboratory evaluation of asphalt mixtures containing bio-binder technologies[C]//Airfield and Highway Pavement Conference. Reston: American Society of Civil Engineers, 2013: 128-152.
- [5] YANG X, YOU Z, DAI Q, *et al.* Mechanical performance of asphalt mixtures modified by bio-oils derived from waste wood resources[J]. Construction & Building Materials, 2014, 51(31): 424-431.
- [6] HAJJ E Y, SOULIMAN M I, ALAVI M Z, *et al.* Influence of hydrogreen bioasphalt on viscoelastic properties of reclaimed asphalt mixtures[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2013(2): 13-22.
- [7] WILLIAMS R C, BROWN R C. Bio-oil formulation as an asphalt substitute: 9200161[P]. 2015-12-01.
- [8] 汪海年,高俊锋,赵欣,等. 基于 DSR 和 RV 的生物沥青结合料流变特性研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2015, 42(6): 26-33.
WANG Hainian, GAO Junfeng, ZHAO Xin, *et al.* Rheological properties on bio-binder based on DSR and RV[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(6): 26-33. (In Chinese)
- [9] 孙朝杰. 废旧油脂类生物沥青路用性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 2014: 58-59.
SUN Zhaojie. Pavement performance of waste oil-based bioasphalt[D]. Harbin: School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 2014: 58-59. (In Chinese)
- [10] 黄海龙. 生物沥青及其混合料路用性能研究[D]. 北京: 北京建筑大学土木与交通工程学院, 2015: 61-64.
HUANG Hailong. Research on the pavement performances of bio-asphalt and its mixture [D]. Beijing: School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2015: 61-64. (In Chinese)
- [11] 靳超. 植物沥青路用性能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学土木工程学院, 2015: 59-60.
JIN Chao. The study of the road performance of plant asphalt [D]. Hohhot: College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, 2015: 59-60. (In Chinese)
- [12] 曾梦澜,潘浩志,田振,等. 老化对生物沥青改性沥青结合料使用性能的影响[J]. 公路工程, 2016, 41(2): 28-32.
ZENG Menglan, PAN Haozhi, TIAN Zhen, *et al.* Aging effects on performance of asphalt binder modified with bioasphalt[J]. Highway Engineering, 2016, 41(2): 28-32. (In Chinese)
- [13] 潘浩志. 生物沥青改性沥青结合料使用性能研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2016: 55-56.
PAN Haozhi. Evaluating performance of bioasphalt modified asphalt binder[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2016: 55-56. (In Chinese)
- [14] 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: 8-31.
JTG F40—2004 Technical specifications for construction of highway asphalt pavements [S]. Beijing: China Communications Press, 2004: 8-31. (In Chinese)
- [15] 吴超凡,曾梦澜,王茂文,等. 添加 Sasobit 温拌沥青混合料的拌合与压实温度确定[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2010, 37(8): 1-5.
WU Chaofan, ZENG Menglan, WANG Maowen, *et al.* Determination of the mixing and compaction temperatures for warm mix asphalt with Sasobit [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2010, 37(8): 1-5. (In Chinese)
- [16] JTG E20—2011 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: 186-298.
JTG E20—2011 Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2011: 186-298. (In Chinese)
- [17] 黄晓明. 沥青与沥青混合料[M]. 南京: 东南大学出版社, 2002: 207-240.
HUANG Xiaoming. Asphalt and asphalt mixture [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2002: 207-240. (In Chinese)
- [18] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001: 414-453.
SHEN Jinan. Performance of asphalt and asphalt mixture[M]. Beijing: China Communications Press, 2001: 414-453. (In Chinese)
- [19] 黄晓明. 路基路面工程[M]. 4 版. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2014: 310-400.
HUANG Xiaoming. Road subgrade and pavement engineering [M]. 4th ed. Beijing: China Communications Press Co., Ltd, 2014: 310-400. (In Chinese)