

## 欧洲岩沥青改性沥青混合料使用性能试验研究\*

曾梦澜<sup>†</sup>,朱艳贵,田伟,谢学成  
(湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082)

**摘要:**为研究欧洲岩沥青改性沥青混合料的使用性能,制备了最大掺量达20%的欧洲岩沥青改性沥青,进行了AC-20C不同掺量改性沥青混合料的配合比设计,根据各掺量最佳油石比制作试件并进行了混合料使用性能试验.根据试验结果分析了不同掺量改性沥青混合料的动稳定度、马歇尔稳定度、流值、马歇尔模数、浸水残留稳定度、冻融劈裂残留强度比、弯曲破坏应变、15℃和20℃抗压回弹模量和15℃劈裂强度等技术参数.试验结果表明,随着欧洲岩沥青掺量的增加,改性沥青混合料的高温稳定性、水稳定性逐渐得到提高,刚度和强度逐渐增大.随着欧洲岩沥青掺量的增加,改性沥青混合料的低温抗裂性先提高至一峰值后略有回落.考虑综合性能,推荐的欧洲岩沥青最佳掺量为10%~20%.

**关键词:**欧洲岩沥青;改性沥青混合料;使用性能;试验研究

**中图分类号:**U416.217

**文献标志码:**A

## Experimental Study on Performance of European Rock Asphalt Modified Asphalt Mixture

ZENG Menglan<sup>†</sup>, ZHU Yangui, TIAN Wei, XIE Xuecheng  
(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** In order to investigate the performance of European rock asphalt modified asphalt mixture, modified asphalt binder containing up to 20% of European rock asphalt was prepared. Design of AC-20C modified asphalt mixture with different percentages of rock asphalt was conducted. Performance tests were carried out on the specimens with optimum asphalt contents of respective percentages of rock asphalt. Based on the test results, the properties such as dynamic stability, Marshall stability, flow value, Marshall quotient, retained Marshall stability, indirect tensile strength ratio, flexural tensile strain, compression moduli at 15℃ and 20℃, and indirect tensile strength at 15℃ were analyzed. The analyses indicate that with the increasing percentage of rock asphalt, the high temperature stability and the moisture susceptibility of the modified asphalt mixture were improved, and the stiffness and strength of the modified asphalt mixture increased. With the increasing percentage of rock asphalt, the low-temperature cracking resistance of the modified asphalt mixture increased to the peak value, and then fell down slightly. Considering the overall performance, the recommended optimum use of European rock asphalt in the modified asphalt binder ranged from 10% to 20%.

\* 收稿日期:2016-05-20

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

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: menglanzeng@hnu.edu.cn

**Key words:** European rock asphalt; modified asphalt mixture; performance; experimental study

目前,道路交通量大和车辆轴载重已经成为一种普遍现象.为了保证沥青路面的稳定性和耐久性,减少沥青路面的损坏,必须采用性能良好的沥青混合料.鉴于这一点,道路科技工作者研发了许多性能优良的改性沥青.目前,使用较多的改性沥青主要有聚合物改性沥青,环氧沥青和天然沥青改性沥青.由于各种改性沥青优缺点兼备,当对沥青性能要求较高时,可以采用含2种或者2种以上改性剂的复合改性沥青,其中,SBS与其他改性剂复合是最常用的方式<sup>[1-3]</sup>.天然沥青分为岩沥青、湖沥青、海底沥青,具体有布敦岩沥青、北美岩沥青、伊朗岩沥青、青川岩沥青、特立尼达湖沥青等,有关研究<sup>[4-7]</sup>表明它们能提高沥青混合料的高温稳定性和水稳定性.

欧洲岩沥青是一种产自东南欧巴尔干半岛的天然沥青,可破碎成黑色固体小颗粒,其沥青质含量高、软化点高、含氮量高、不含蜡、生物毒性低、抗老化能力强.欧洲岩沥青在国外已有应用,国内也有一定研究,文献[8]对欧洲岩沥青改性沥青结合料使用性能进行了系统研究,本文在其基础上进行了欧洲岩沥青改性沥青混合料使用性能研究.

为了较为全面地了解欧洲岩沥青对改性沥青混合料使用性能的影响,先用欧洲岩沥青对基质沥青改性,然后对改性沥青混合料进行性能试验,最后分析不同掺量改性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,推荐欧洲岩沥青的最佳掺量范围,从而为欧洲岩沥青改性沥青混合料在工程中应用提供借鉴和指导.

## 1 试验材料

### 1.1 原材料

本研究所采用的沥青有70号A级道路石油沥青和欧洲岩沥青,70号沥青的技术指标、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》<sup>[9]</sup>的技术要求.欧洲岩沥青的技术指标、技术要求和试验结果见表2,其技术指标的试验结果均满足JT/T 860.5—2014《沥青混合料改性添加剂第5部分:天然沥青》<sup>[10]</sup>的技术要求.

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》<sup>[9]</sup>的技术要求.

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)	60~80	69.8
针入度指数PI	-1.5~+1.0	-1.10
软化点/℃	≥46	46.3
延度(15℃)/cm	≥100	>100
闪点/℃	≥260	262
溶解度/%	≥99.5	99.9
密度(15℃)/(g·m <sup>-3</sup> )	实测	1.014
质量损失/%	≤±0.8	0.07
RTFOT后 残留针入度比(25℃)/%	≥61	62.6

表2 欧洲岩沥青技术指标

Tab.2 Technical properties of European rock asphalt

技术指标	技术要求	试验结果
三氯乙烯溶解度/%	—	80.2
灰分/%	≤15	9.6
含水率/%	≤2	0.42
4.75mm	100	100
粒度范围/% 2.36mm	95~100	100
1.18mm	>80	86

### 1.2 改性沥青的制备

向沥青混合料中添加欧洲岩沥青,可采用“干法”或“湿法”工艺.“干法”工艺是先将加热到规定温度的粗细集料加入拌和机中,然后加入岩沥青拌和90s,再加入基质沥青拌和90s,最后加入加热的矿粉拌和120s<sup>[11]</sup>.“湿法”工艺是先制得改性沥青,然后将加热到规定温度的改性沥青与粗细集料在拌和机中拌和90s,最后加入加热的矿粉拌和90s<sup>[11]</sup>.本研究采用了“湿法”工艺.

先用烘箱将70号沥青加热到150℃左右,按照一定掺量加入欧洲岩沥青,边加边搅拌,使两种沥青充分混合均匀,然后将其在温度为155℃左右的烘箱中放置1h,取出,再在155℃左右的油浴温度下用高速剪切仪以3000r/min的转速搅拌1h即可.本研究设定的欧洲岩沥青掺量分别为0%,5%,10%,15%和20%.其中,欧洲岩沥青掺量是指欧洲岩沥青与基质沥青的质量比.

## 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种不同掺量的欧洲岩沥青改性沥青为结合料,与相同级配的集料制备沥青混合料 AC-20C,集料级配组成见表3.

利用5种不同掺量欧洲岩沥青改性沥青的黏度与温度的关系,采用等黏度原则<sup>[12]</sup>确定不同混合料的拌和与压实温度.

欧洲岩沥青中含有质量分数为19.8%的矿物质,可将其看作矿粉.根据加入集料中的改性沥青所含矿物质的质量多少相应减少单独加入的矿粉的质量,以保证混合料中矿粉的质量不变<sup>[13]</sup>.

根据马歇尔试验配合比设计方法得到欧洲岩沥青掺量分别为0%,5%,10%,15%和20%的沥青混合料的最佳油石比分别为4.8%,4.8%,4.9%,4.9%和4.9%.

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	96.5
16	92	78	87.0
13.2	80	62	77.5
9.5	72	50	66.0
4.75	56	26	38.0
2.36	44	16	23.5
1.18	33	12	17.3
0.6	24	8	12.6
0.3	17	5	8.6
0.15	13	4	5.9
0.075	7	3	4.5

## 2.2 混合料使用性能试验

根据已经确定的最佳油石比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》<sup>[14]</sup>进行车辙试验、马歇尔试验、浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验、弯曲试验、单轴压缩试验、劈裂试验.其中车辙试验方法采用 T0719—2011“沥青混合料车辙试验”;马歇尔试验和浸水马歇尔试验方法采用 T0709—2011“沥青混合料马歇尔稳定度试验”;冻融劈裂试验方法采用 T0729—2000“沥青混合料冻融劈裂试验”;弯曲试验方法采用 T0715—2011“沥青混合料弯曲试验”;劈裂试验方法采用 T0716—2011“沥青混合料劈裂试验”;单轴压缩试验方法采用 T0713—2000“沥青混合料单轴压缩试验(圆柱体法)”.

## 3 试验结果分析

### 3.1 高温稳定性

沥青混合料的高温稳定性是指在高温条件和

车辆荷载的共同作用下,沥青混合料抵抗永久变形的能力<sup>[15]</sup>.沥青路面产生的车辙、搓板、拥包、泛油、推移等现象是沥青混合料高温稳定性较差的结果.

不同掺量欧洲岩沥青改性沥青混合料的车辙试验的动稳定度见图1.从图1可以看出,沥青混合料的动稳定度随着欧洲岩沥青掺量的增大而逐渐增大.掺量分别为0%,5%,10%,15%和20%的沥青混合料的动稳定度分别为1 469,2 142,3 027,4 423和5 526次/mm.与基质沥青混合料相比,改性沥青混合料的动稳定度分别提高了46%,106%,201%和276%.说明欧洲岩沥青的掺入改善了混合料在高温条件下抵抗永久变形的能力,且当欧洲岩沥青掺量为10%~20%时,它对沥青混合料高温稳定性的改善效果比欧洲岩沥青掺量小于10%的更加明显.

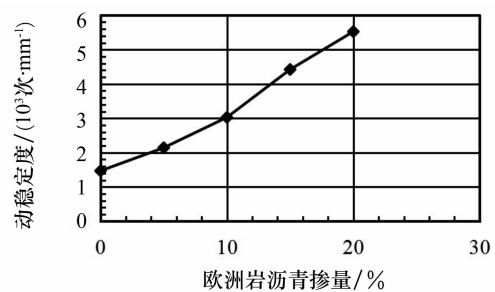


图1 不同掺量欧洲岩沥青改性沥青混合料的动稳定度  
Fig.1 Dynamic stabilities of European rock asphalt modified mixture with different percentages

不同掺量欧洲岩沥青改性沥青混合料的马歇尔试验的稳定度、流值、马歇尔模数见图2.从图2可以看出,随着欧洲岩沥青掺量增大,混合料的稳定度逐渐增大,流值逐渐减小,马歇尔模数逐渐增大.掺量分别为0%,5%,10%,15%和20%的混合料的稳定度分别为8.81,9.36,10.34,10.72和11.59 kN;与基质沥青混合料相比,改性沥青混合料的稳定度分别提高了6.2%,17.4%,21.7%和31.6%.掺量分别为0%,5%,10%,15%和20%的混合料的流值分别为3.26,2.81,2.64,2.59和2.42 mm;与基质沥青混合料相比,改性沥青混合料的流值分别降低了13.8%,19.0%,20.6%和25.8%.掺量分别为0%,5%,10%,15%和20%的混合料的马歇尔模数分别为2.70,3.33,3.92,4.14和4.79 kN/mm;与基质沥青混合料相比,改性沥青混合料的马歇尔模数分别提高了23.3%,45.2%,53.3%和77.4%.以上所述说明欧洲岩沥青的掺入提高了沥青混合料的高温承载能力和高温抗变形能力.

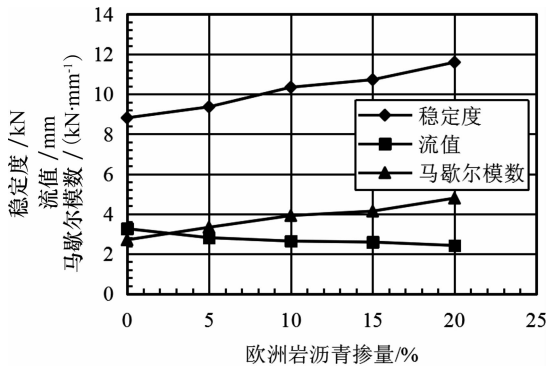


图 2 不同掺量岩沥青改性沥青混合料的马歇尔试验指标

Fig.2 Marshall properties of European rock asphalt modified mixture with different percentages

### 3.2 水稳定性

水损害是指在车辆荷载作用下,进入路面孔隙中的水产生动水压力或循环真空负压抽吸,水分逐渐进入到集料和沥青的接触面上,沥青与集料的黏附性降低,沥青混合料产生松散、掉粒,沥青路面形成坑槽的损坏现象<sup>[16]</sup>.沥青混合料的水稳定性是指其抵抗水损害的能力.

不同掺量欧洲岩沥青改性沥青混合料的浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验结果见图 3 和图 4.从图 3 可以看出,掺加欧洲岩沥青后,改性沥青混合料的浸水残留稳定度得到了明显提高,岩沥青掺量分别为 5%,10%,15%,和 20%的改性沥青混合料的浸水残留稳定度从基质沥青混合料的 88.3%分别提高到 90.1%,94.9%,97.1%和 98.3%.此外,改性沥青混合料的冻融劈裂残留强度比也得到了提高,岩沥青掺量分别为 5%,10%,15%和 20%的改性沥青混合料的冻融劈裂残留强度比从基质沥青混合料的 83.2%分别提高到 85.0%,87.1%,90.9%和 97.9%.从图 4 可以看出,当岩沥青掺量不超过 10%时,冻融劈裂残留强度比增加幅度不大.岩沥青掺量为 20%的冻融劈裂残留强度比比岩沥青掺量为 10%的增大了 10.8%,提高效果更为明显.以上说明了欧洲岩沥青的掺入使集料和沥青的黏附性和抗剥离性得到明显改善,混合料的抗水损害能力明显增强,岩沥青掺量大于 10%时,效果更好.改性沥青混合料的水稳定性得到提高的原因可能是欧洲岩沥青含氮量高,且氮元素以官能团的形式存在<sup>[13]</sup>.

### 3.3 低温抗裂性

气温骤降使温度应力超过沥青混合料的抗拉强度或温度循环使沥青混合料极限拉应变减小均

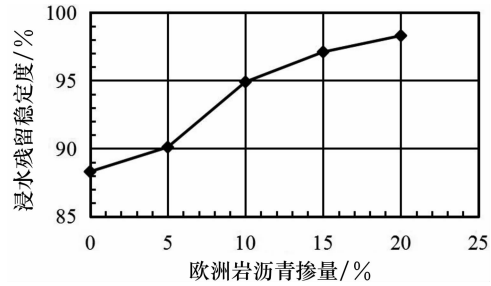


图 3 不同掺量岩沥青改性沥青混合料的浸水残留稳定度

Fig.3 Retained Marshall stabilities of European rock asphalt modified mixture with different percentages

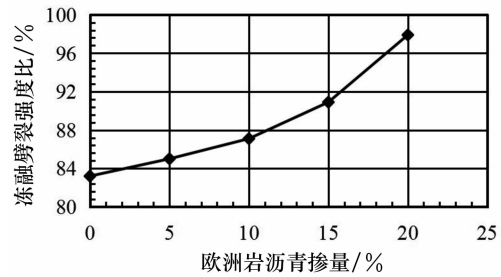


图 4 不同掺量岩沥青改性沥青混合料的冻融劈裂强度比

Fig.4 Indirect tensile strength ratios of European rock asphalt modified mixture with different percentages

能造成沥青混合料低温开裂<sup>[15]</sup>.

不同掺量欧洲岩沥青改性沥青混合料的弯曲试验结果见图 5 和图 6.从图 5 可以看出,低温破坏弯拉应变随着欧洲岩沥青掺量的增大先增大后减小.欧洲岩沥青掺量分别为 5%和 10%的改性沥青混合料的破坏弯拉应变由基质沥青混合料的 2 346  $\mu\epsilon$  增大到 2 638  $\mu\epsilon$  和 2 749  $\mu\epsilon$ ,且增长速度逐渐变慢.当欧洲岩沥青掺量分别为 15%和 20%时,破坏弯拉应变又分别减小为 2 705  $\mu\epsilon$  和 2 606  $\mu\epsilon$ .说明在某一掺量范围内,改性沥青混合料的低温抗裂性能逐渐改善,超过某一掺量后,其低温抗裂性能又略微变差.从图 6 可以看出,沥青混合料的低温弯拉劲度模量随欧洲岩沥青掺量的增大而增大.说明欧洲岩沥青掺量越高,沥青混合料低温的刚度变大.

### 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弹性层状连续体系理论,以路表面的回弹弯沉值、沥青混合料层和半刚性材料层层底拉应力为设计指标进行路面结构厚度设计<sup>[15]</sup>.计算路表回弹弯沉值指标时,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

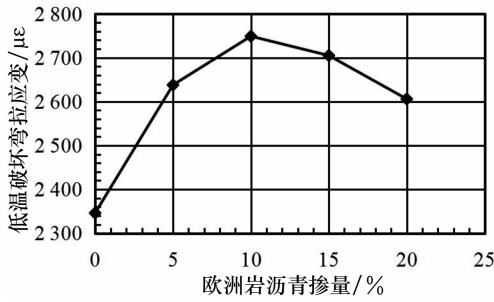


图5 不同掺量岩沥青改性沥青混合料的低温破坏弯拉应变

Fig.5 Low temperature flexural tensile strains of European rock asphalt modified mixture with different percentages

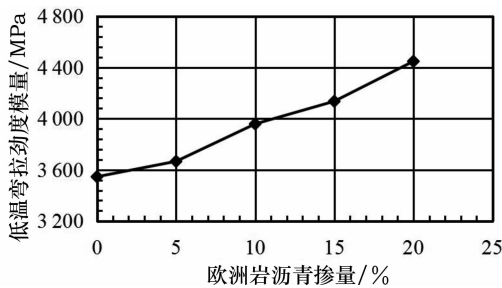


图6 不同掺量岩沥青改性沥青混合料的低温弯拉劲度模量

Fig.6 Low temperature flexural tensile moduli of European rock asphalt modified mixture with different percentages

层层底拉应力指标时,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℃.

不同掺量欧洲岩沥青改性沥青混合料的单轴压缩试验结果见表4和表5.从表4以及表5可以看出,沥青混合料15℃的抗压强度和抗压回弹模量均随着欧洲岩沥青掺量的增大而增大,20℃的试验结果亦是如此.以沥青混合料15℃的保证率为95%的抗压回弹模量为例,掺量分别为5%,10%,15%和20%的沥青混合料的抗压回弹模量比基质沥青混合料分别提高了5.5%,15.3%,21.5%和28.1%.说明欧洲岩沥青的掺入能有效地提高沥青混合料的强度和刚度,增强抗疲劳性能和抗变形能力,从而可以延长沥青路面的使用寿命.

表4 沥青混合料15℃单轴压缩试验结果

Tab.4 Results of compression tests at 15℃ 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	3.87	1 639	1 680
5	4.37	1 729	1 794
10	4.68	1 889	1 970
15	5.16	1 992	2 068
20	5.78	2 099	2 175

表5 沥青混合料20℃单轴压缩试验结果

Tab.5 Results of compression tests at 20℃ 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	3.13	1 163	1 199
5	3.47	1 351	1 402
10	3.78	1 514	1 552
15	3.89	1 565	1 607
20	3.94	1 643	1 678

不同掺量欧洲岩沥青改性沥青混合料的劈裂试验结果见表6.从表6可以看出,沥青混合料的15℃劈裂强度随着欧洲岩沥青掺量的增大逐渐增大,岩沥青掺量分别为5%,10%,15%和20%的改性沥青混合料的劈裂强度与基质沥青混合料相比分别增加0.032,0.106,0.129和0.169MPa,增长幅度不太大.15℃劈裂破坏拉伸应变随着欧洲岩沥青掺量的增大逐渐减小,破坏劲度模量随着欧洲岩沥青掺量的增大逐渐增大.说明随着欧洲岩沥青掺量的增大,沥青混合料抵抗疲劳开裂的能力得到增强<sup>[17]</sup>,从而增强了承担路面交通荷载的能力.

表6 沥青混合料15℃劈裂试验结果

Tab.6 Results of splitting tests at 15℃ for asphalt mixture

掺量/%	劈裂强度 $R_T$ /MPa	破坏应变 $\epsilon_T$ /με	破坏模量 $S_T$ /MPa
0	1.473	10 366	328
5	1.505	8 218	398
10	1.579	6 479	418
15	1.602	5 471	429
20	1.642	4 683	457

### 3.5 欧洲岩沥青推荐掺量范围

本文所研究的欧洲岩沥青改性沥青混合料不针对特定的使用地区.但为合理推荐欧洲岩沥青的最佳掺量范围,假定欧洲岩沥青改性沥青混合料的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》,在夏炎热冬温潮湿区,改性沥青混合料的动稳定度不小于2 800次/mm,浸水马歇尔试验残留稳定度不小于85%,冻融劈裂试验残留强度比不小于80%,低温弯曲试验破坏应变不小于2 500 με<sup>[9]</sup>.因此,推荐欧洲岩沥青的最佳掺量为10%~20%.对于夏热冬温区,欧洲岩沥青的最佳掺量范围的下限可适当降低.

## 4 结论

为研究欧洲岩沥青改性沥青混合料的使用性能,首先制备了最大掺量达20%的欧洲岩沥青改性

沥青,进行了 AC-20C 不同掺量改性沥青混合料配合比设计。根据各掺量最佳油石比制作试件并进行了混合料使用性能试验。进而,根据试验结果分析了不同掺量改性沥青混合料的动稳定度、马歇尔稳定度、流值、马歇尔模数、浸水残留稳定度、冻融劈裂残留强度比、弯曲应变、15 °C 和 20 °C 抗压回弹模量、15 °C 劈裂强度等技术参数,评价了欧洲岩沥青改性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,并推荐了欧洲岩沥青的最佳掺量范围。试验结果表明:

1) 随着岩沥青掺量的增加,沥青混合料的动稳定度、马歇尔稳定度、马歇尔模数均增大,流值减小,说明岩沥青的掺入可以提高沥青混合料的高温稳定性,且掺量越大,改善效果越显著。

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岩沥青掺量的增加而增大。说明岩沥青的掺入可提高沥青混合料的水稳定性。

3) 沥青混合料的低温弯拉破坏应变随着岩沥青掺量的增加先增大至一峰值后略有回落。说明在岩沥青的掺量较小时,岩沥青的掺入可以提高沥青混合料的低温抗裂性;当岩沥青的掺量较大时,沥青混合料的低温抗裂性的提高有所收窄。

4) 沥青混合料的 15 °C 及 20 °C 抗压回弹模量均随着岩沥青掺量的增大而增大。说明岩沥青的掺入可以提高沥青混合料的刚度,增强抗变形能力。沥青混合料的 15 °C 劈裂强度随着岩沥青掺量的增加而增大。说明岩沥青的掺入可以提高混合料的强度,增强抵抗荷载的能力。

5) 综合考虑改性沥青混合料的高温稳定性、水稳定性和低温抗裂性,在夏炎热冬温潮湿区,推荐欧洲岩沥青的最佳掺量范围为 10%~20%。在夏热冬温区,欧洲岩沥青的最佳掺量范围的下限可适当降低。

## 参考文献

- [1] KÖK B V, YILMAZ M, GULER M. Evaluation of high temperature performance of SBS + gilsonite modified binder[J]. Fuel, 2011, 90(10): 3093-3099.
- [2] 《中国公路学报》编辑部. 中国道路工程学术研究综述[J]. 中国公路学报, 2013, 26(3): 7-10. Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's road engineering research[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(3): 7-10. (In Chinese)
- [3] 杜少文. 岩沥青 SBS 复合改性沥青混合料的性能与机理[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(6): 871-874. DU Shaowen. Performance and mechanism of BRA-SBS polymer composite modified asphalt mixture[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(6): 871-874. (In Chinese)
- [4] 季根忠, 朱红旗, 何宁德, 等. 国产天然沥青改性剂的开发[J]. 公路交通科技, 2002, 19(6): 25-27. JI Genzhong, ZHU Hongqi, HE Ningde, et al. Development of home-made natural asphalt modifier[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 19(6): 25-27. (In Chinese)
- [5] SUO Z, WONG W G. Analysis of fatigue crack growth behavior in asphalt concrete materials in wearing course[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1): 462-468.
- [6] AFLAKI S, TABATABAEE N. Proposals for modification of Iranian bitumen to meet the climatic requirements of Iran[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(6): 2141-2150.
- [7] AMERI M, MANSOURIAN A, ASHANI S S, et al. Technical study on the Iranian gilsonite as an additive for modification of asphalt binders used in pavement construction[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(3): 1379-1387.
- [8] 曾梦澜, 赵宇, 潘浩志, 等. 欧洲岩沥青改性沥青混合料使用性能试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2016, 43(5): 125-130. ZENG Menglan, ZHAO Yu, PAN Haozhi et al. An experimental study on performance of European rock asphalt modified asphalt binder [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2016, 43(5): 125-130. (In Chinese)
- [9] 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)
- [10] JT/T 860.5—2014 沥青混合料改性添加剂第 5 部分: 天然沥青[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014: 1-2. JT/T 860.5—2014 Modifier for asphalt mixture—part 5: natural asphalt[S]. Beijing, People's Communications Press, 2014: 1-2. (In Chinese)
- [11] 黄文通. 北美岩沥青及其混合料特性研究[D]. 广州: 华南理工大学土木与交通学院, 2014: 76-78. HUANG Wentong. Research on characteristic behavior for North American rock asphalt and asphalt mixtures[D]. Guangzhou: School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, 2014: 76-78. (In Chinese)
- [12] 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)
- [13] 李瑞霞, 郝培文, 王春, 等. 布敦岩沥青混合料路用性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(9): 50-54. LI Ruixia, HAO Peiwen, WANG Chun, et al. Study on pavement performances of BRA modified asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(9): 50-54. (In Chinese)
- [14] 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: 186-301. JTG E20—2011 Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering[S]. Beijing: People's Communications Press, 2011: 186-301. (In Chinese)
- [15] 黄晓明. 路基路面工程[M]. 4 版. 北京: 人民交通出版社, 2014: 310-400. HUANG Xiaoming. Road subgrade and pavement engineering [M]. 4th ed. Beijing: People's Communications Press, 2014: 310-400. (In Chinese)
- [16] 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: People's Communications Press, 2001: 414-453. (In Chinese)
- [17] 梅迎军, 李志勇, 梁乃兴, 等. 水-温-荷耦合作用下沥青混凝土疲劳寿命[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2011, 38(2): 13-17. MEI Yingjun, LI Zhiyong, LIANG Naixing, et al. Fatigue life of asphalt concrete under moisture-temperature-loading coupling action[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2011, 38(2): 13-17. (In Chinese)