

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.057

岩沥青与 SBS 复合改性高黏沥青的配比研究

黄刚¹, 贺俊玺¹, 张霞¹, 龚巍²

(1. 重庆交通大学 交通土建工程材料国家地方联合工程实验室, 重庆 400074;

2. 湖南大学 设计研究院有限公司, 长沙 410082)

摘要:以中海 AH-70# 基质沥青为基本原料, 采用中东天然岩沥青与 SBS 改性剂复合改性制备高黏沥青。通过均匀设计的方法设计岩沥青与 SBS 改性剂的复配材料组成, 并采用针入度试验、延度试验、软化点试验、60 °C 动力黏度试验、布氏黏度试验以及 DSR 试验对复合改性高黏沥青的性能进行测试。结果表明: 针入度和延度受岩沥青掺比的控制影响较大; 而软化点受 SBS 改性剂掺比的控制影响较大; 复合掺量与 60 °C 动力黏度、布氏黏度以及抗车辙因子均成正相关关系。基于试验分析, 采用 SPSS 软件建立回归模型, 运用 MATLAB 软件计算分析得到天然岩沥青与 SBS 改性剂的最佳复合掺配比例分别为: 5.4% 和 6.4%。

关键词: 岩沥青; SBS 改性剂; 复合改性沥青; 配比

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2020)03-031-14

Study on the ratio of rock asphalt and SBS composite modified high viscosity asphalt

HUANG Gang¹, HE Junxi¹, ZHANG Xia¹, GONG Wei²

(1. National and Local Joint Engineering Laboratory of Traffic Civil Engineering Materials, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China; 2. Hunan University Design Institute Co., Ltd, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China)

Abstract: In this paper, the composite modified high viscosity asphalt was prepared by using the AH-70# matrix asphalt, the Middle East natural rock asphalt and the SBS modifier. The combination of rock bitumen and SBS modifier was designed by using homogeneous design method and the performance of modified asphalt was determined by penetration test, ductility test, softening point test, 60 °C dynamic viscosity test, Brookfield viscosity test and DSR test. The test shows that the amount of rock asphalt has a great influence on the penetration degree and the ductility, the amount of SBS modifier has a great influence on the softening point and the compound content has a positive correlation with the 60 °C dynamic viscosity, the Brookfield viscosity and the anti-rutting factor. Through the test analysis, SPSS software

收稿日期: 2019-10-09 **网络出版日期:** 2020-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(面上)项目(51778096); 重庆市科委基础科学与前沿技术研究项目(cstc2016jcyjA0119)。

Supported by National Natural Science Fund of China (General Program) (51778096), and Special Projects of Basic Science and Frontier Technology Research of Chongqing Science and Technology Commission (cstc2016jcyjA0119).

作者简介: 黄刚(1971—), 男, 博士, 教授, 主要从事道路工程材料方向研究, (Email) hg_2004@126.com。

was used to establish regression model, and MATLAB software was used to calculate and analyze the optimal mix proportion of natural rock asphalt and SBS modifier: 5.4% and 6.4%, respectively.

Keywords: rock asphalt; SBS modifier; compound modified asphalt; mixture ratio

目前,中国公路交通量增长迅速,超重载持续增加,对沥青混凝土路面提出了越来越高的要求,促进了改性沥青的快速发展^[1-4]。在层出不穷的沥青改性剂中,天然岩沥青已日渐被关注,因为其与各种沥青均具有良好的配伍性,便于生产、运输等特点^[5-8]。近年来,在交通领域的道路研发方面,应用岩沥青的规模越来越大,其中包括了北美岩沥青以及国内广元、新疆等地出产的岩沥青。基质沥青可以通过添加一定量的天然岩沥青,使其高温稳定性和路面抗车辙的能力有较大幅度提高^[9-13],同时,SBS改性剂是现有沥青改性剂中,综合表现最好的沥青改性剂之一,被广泛应用于道路路面的建设或用于进行各类材料的复合改性沥青的研发,该改性剂可使沥青的综合路用性能得到一定幅度的提升,价格低廉具有高性价比的特点^[14-18]。

笔者主要以均匀设计方法为主,着重研究岩沥青与 SBS 改性剂复合改性制备高黏沥青的配比问题,分别对制备出的复合改性沥青进行一系列沥青性能试验,并以高黏沥青的指标为基准,以制备出的复合改性沥青的基本性能为参考指标,建立该复合配比的数学模型,通过 MATLAB 软件计算确定岩沥青与 SBS 改性剂的最佳配比,研发出基于该配比下的复合高黏沥青材料。

1 试验原料

试验原料:基质沥青(中海 AH-70# 沥青);岩沥青(伊朗的中东的岩沥青);SBS 改性剂(SBS-4401 热塑丁苯橡胶,中国石化巴陵石油化工有限公司生产)。3 种材料的基本性能指标分别如表 1~表 3 所示。

表 1 中海 AH-70# 沥青性能指标

Table 1 CNOOC AH-70# asphalt performance index

检测项目	实测结果	技术指标
针入度(25 °C, 5s, 100 g)/0.1mm	64	60~80
延度(15 °C, 5 cm/min)/cm	103	≥100
延度(5 °C, 5 cm/min)/cm	26.8	≥20
软化点/°C	46.2	≥45
密度(15 °C)/g/cm ³	1.029	实测
蜡含量/%	2.04	≤2.2
质量变化/%	- 0.178	≤±0.8
RTFOT 后		
残留针入度比/%	63.5	≥61
10 °C 延度/cm	8.6	≥6

表 2 中东岩沥青性能指标

Table 2 Performance index of Middle East Rock asphalt

项目	参数
颜色	黑色
密度/(g · cm ⁻³)	1.02
闪点/°C	235
软化点/°C	170~200
目数	30~100
灰分/%	8

续表2

项目	参数
炭/%	84.88
硫/%	3.16
氧/%	1.52
氢/%	5.96
氮/%	0.78
1.18 mm 筛孔通过率/%	100
0.3 mm 筛孔通过率/%	99.3
0.075 mm 筛孔通过率/%	22.4

表 3 SBS 改性剂性能指标

Table 3 Performance index of SBS modifier

项目	参数
结构	星型
苯乙烯含量/%	40
分子量/万	15
其他	不饱和

2 改性沥青制备方法

改性高黏沥青的制备步骤:1)将基质沥青熔化;2)直接掺入试验所需用量的 SBS 改性剂,进行适当搅拌,保持在 160 °C 下 1 h,进行溶胀发育;3)接着以 4 000~5 000 r/min 的转速,在 180 °C 的温度下,高速剪切 1 h;4)再以 800 r/min 的转速高速剪切 1 h;5)再放置于 170 °C 的烘箱中,恒温烘 2 h,并在室温(25 °C)下,静置发育 1 d;6)将天然岩沥青分 3 次加入已成型的 SBS 沥青中,每次加入的量均应大致相等,注意在每次岩沥青加入后,应置于 180 °C 的油浴中,并进行 15 min 高速剪切,以 4 000~5 000 r/min 的转速,再高速剪切 5 min,以 1 000 r/min 的转速,分别重复 3 次,总的剪切时间为 1 h;7)最后将样品在 170 °C 的烘箱中烘 2 h 进行高温处理,取出后在常温条件下(25~30 °C)自然冷却 24 h,即可。其制备流程如图 1 所示。

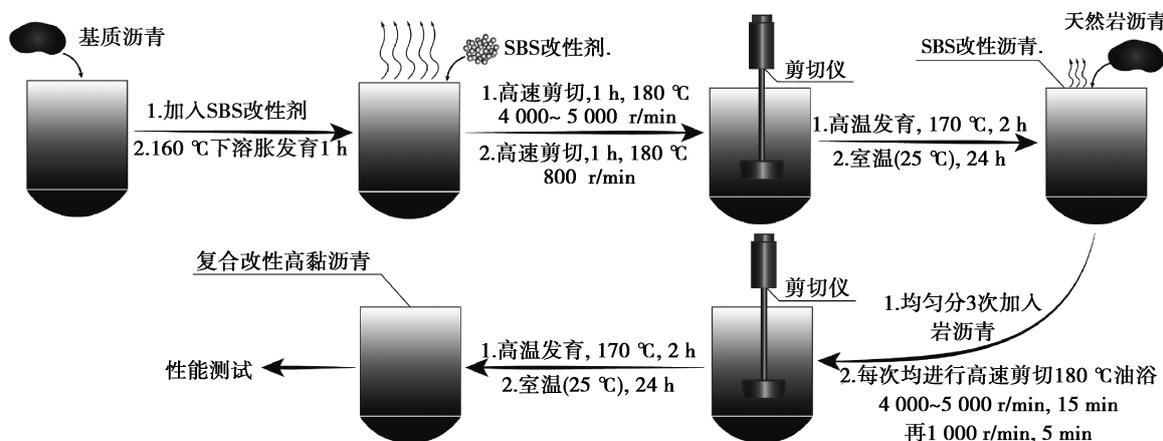


图 1 改性沥青制备流程图

Fig. 1 Preparation flow chart of modified asphalt

3 基于均匀设计法试验掺量组合设计

利用均匀设计表,可以从所有的测试点中选择分布均匀、具有反应出体系代表性和主要特征的测试点,从而降低试验次数,减少试验强度。该方法对试验结果不存在较大影响,但应对试验结果采用回归分析方法进行处理分析,从而接近最真实的试验结果。

文中分别采用 X_1 -岩沥青的掺量:2.5%、5%、7.5%、10%、12.5%; X_2 -SBS 改性剂的掺量:4%、5%、6%、7%、8%进行该试验的材料组成设计。各因素参数的选取与均匀设计表的选择分别如表4~表6所示。表4百分数为改性剂占基质沥青的质量百分数。

表4 因素水平表
Table 4 Factor level table

水平	因素	
	X_1 -岩沥青掺量/%	X_2 -SBS 改性剂掺量/%
1	2.5	4.0
2	5.0	5.0
3	7.5	6.0
4	10.0	7.0
5	12.5	8.0

表5 $U_5(5^3)$ 均匀设计表
Table 5 $U_5(5^3)$ homogeneous design table

序号	1	2	3
1	1	2	4
2	2	4	3
3	3	1	2
4	4	3	1
5	5	5	5

表6 $U_5(5^3)$ 使用表
Table 6 $U_5(5^3)$ using table

因素数	列号			D
2	1	2	—	0.310 0
3	1	2	3	0.457 0

由表6可知,偏差值 D 越小,该试验所选取的试验点的均匀分布程度越优,参考文中选取的试验因素,选用第1、2列进行设计。根据表4~表6的参数,设计得到试验材料掺配组合如表7所示。

表 7 试验掺量组合
Table 7 Test admixture combination

掺量组合	X ₁ -岩沥青掺量/%	X ₂ -SBS 改性剂掺量/%
1#	2.5	5.0
2#	5.0	7.0
3#	7.5	4.0
4#	10.0	6.0
5#	12.5	8.0

4 试验结果分析

研究中除试验设计的材料掺配组合外,再采用 1 组成品高黏沥青做对比分析,成品高黏沥青性能指标如表 8 所示(其参数指标参考《高粘高弹道路沥青》(GB/T 30516—2014)与日本《排水性铺装技术指针》)。

表 8 成品高黏沥青性能指标
Performance index of high viscosity asphalt

项目	试验值	规范要求
针入度/0.1 mm	71.0	>40
延度/cm	101.1	>50
软化点/℃	87.5	>80
60℃黏度/(Pa·s)	44 382	>20 000
布氏黏度/(Pa·s)	2.5	≤3

4.1 针入度试验分析

针入度反应了沥青的流变学性能,表示沥青在特定的试验温度条件下的稠度。针入度试验采用 SYD-2801D 针入度仪(下列试验若无特别说明,其试验仪器均为上海昌吉地质仪器有限公司所制造)。试验温度条件为:15℃、25℃、30℃的恒温水浴,试验结果如表 9 所示。

表 9 针入度试验结果
Table 9 Test results of the penetration degree

编号	1#	2#	3#	4#	5#	成品高黏	高黏指标
15℃/0.1mm	20.7	18.7	13.0	10.0	8.0	32.0	25℃ 针入度>40
25℃/0.1 mm	46.3	42.7	32.7	31.0	23.0	71.0	
30℃/0.1 mm	56.0	49.5	43.7	36.5	34.1	80.0	

根据表 9 可知,1#~5# 试验组,针入度值均远远小于对应的成品高黏沥青,说明 2 种改性剂使基质沥青流变性能减弱,导致针入度减小。因为 1#、2#、3#、4#、5# 样品的岩沥青的掺量逐次增加,但 SBS 改性剂的掺量未存在严格递增,说明复合改性沥青的流变性能受天然岩沥青的影响更大。不同试验温度下与成品高黏沥青针入度对比可知,在 15℃、25℃、30℃ 时,1# 试验组的针入度值均为各试验组的最大值,分别为 20.7/0.1 mm、46.3/0.1 mm、56.0/0.1 mm,均小于对应温度下成品高黏沥青的针入度值,32.0/0.1 mm、

71.0/0.1 mm、80.0/0.1 mm,说明所制备的高黏改性沥青稠度更高。在 25 °C 时,1#、2# 样品的针入度值分别为 46.3/0.1 mm 与 42.7/0.1 mm,均大于 40/0.1 mm,满足高黏沥青指标要求。

利用不同岩沥青含量及其相应的针入度,得到岩沥青含量和针入度之间的关系,如图 2 所示。

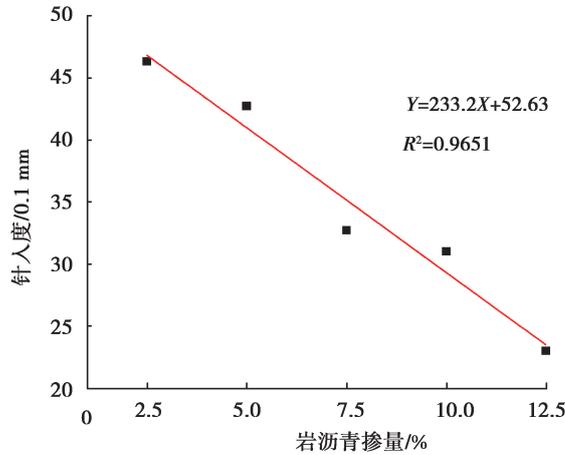


图 2 岩沥青掺量与针入度关系图

Fig. 2 The relation diagram of the amount of rock asphalt and the penetration degree

由图 2 可知,在该复合改性沥青中,岩沥青的掺量与针入度变化情况存在显著线性相关关系,其拟合决定系数为 0.965 1。利用 15 °C、25 °C、30 °C 水浴温度状态下的针入度值,根据式(1)、式(2)计算得到针入度指数 PI 值,如表 10 所示。一般来说,沥青 PI 值越小,温度敏感性越大,沥青性能越差;反之沥青性能越优。

$$\lg P = AT + K, \quad (1)$$

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A}, \quad (2)$$

式中: $\lg P$ 为针入度的对数值,mm; K 为关系式中的截距,mm; T 为测试温度,°C; PI 为针入度指数; A 为感温系数。

表 10 由各温度针入度回归所得 PI 值

Table 10 PI values derived from the regression of each the penetration degree

编号	针入度		PI
	回归方程	相关系数 R^2	
1#	$\lg P = 0.0297T + 0.8838$	0.999	2.072
2#	$\lg P = 0.0293T + 0.8491$	0.998	2.170
3#	$\lg P = 0.0358T + 0.5874$	0.998	0.753
4#	$\lg P = 0.0392T + 0.4377$	0.998	0.135
5#	$\lg P = 0.0425T + 0.2734$	0.999	-0.400
成品高粘	$\lg P = 0.0277T + 1.1072$	0.999	2.579

由表 10 可知,1#、2#、3#、4#、5# 的针入度指数 PI 值分别为 2.072、2.170、0.753、0.135 与 -0.400,1# 与 2# 试验组的 PI 值与成品高黏沥青 PI 值(2.579)接近。3#、4#、5# 试验组的 PI 值远远小于成品 PI 值(2.579)。根据 5# 试验组,岩沥青掺量为 12.5%,PI 值为 -0.400,为负数,根据规范可知,SBS(I-D 型)改性沥青其 PI 值应该大于 0,说明加入的岩沥青大大增加了沥青的温度敏感性。2# 与 3# 试验组,岩沥青掺量分别为 5.0%与 7.5%,仅增加了 2.5%,但针入度指数 PI 从 2.170 急剧减小到 0.753,说明岩沥青的掺量介于

5%~7.5%时,对复合改性沥青感温性的影响敏感度极高。推测岩沥青掺量宜介于5%~7.5%之间。

4.2 延度试验分析

低温延度试验可表征沥青的低温性能,延度试验采用 SYD-45DBF 调温调速的延度拉伸试验仪,试验环境温度温度为 15 ℃ 恒温水浴。延度试验结果如表 11 所示。

表 11 延度试验结果
Table 11 Test result of ductility

编号	1#	2#	3#	4#	5#	成品高黏	高黏指标
长度/cm	90.8	74.7	30.7	38.5	28.4	101.1	> 50

改性沥青 1#、2# 的延度值分别为 90.8 cm、74.4 cm,满足高黏沥青延度指标要求(≥ 50 cm),低于成品高黏沥青延度值;3#、4#、5# 的延度分别为 30.7 cm、38.5 cm、28.4 cm,都低于 50 cm。2# 与 3# 试验组,岩沥青掺量分别为 5.0%、7.5%,仅增加了 2.5%,但延度减小值达 44.0 cm。当岩沥青掺量值大于 7.5%时,尽管对应试验组的 SBS 改性剂掺量值有所增加,但延度值都在 28~40 cm 之间,小于 50 cm。说明改性沥青的延度受岩沥青的负影响作用,在复合改性掺配中岩沥青掺量宜小于 7.5%。

4.3 软化点试验分析

软化点表示沥青从固态变为液体的 1 个临界温度,可表征沥青的高温稳定性。软化点试验采用 SYD-2806E 软化点试验仪,软化点试验结果如表 12 所示。

表 12 软化点试验结果
Table 12 The test result of softening point

编号	1#	2#	3#	4#	5#	成品高黏	高黏指标
温度/℃	69.8	74.8	67.3	82.7	89.3	87.5	> 80

由表 12 可知,1#、2#、3# 的软化点分别为 69.8 ℃、74.8 ℃、67.3 ℃均低于高黏沥青软化点的合格指标(> 80 ℃),4# 与 5# 的软化点分别为 82.7 ℃、89.3 ℃,均大于该合格指标。根据 2 种改性剂特性可知,改性剂的总掺量与改性高黏沥青的软化点有关,当 5# 改性剂复合掺量最大时(达到 20.5%),其软化点比成品高黏沥青还要高。然而,1# 的总掺量最小,只有 7.5%;3# 的总掺量虽然大于 1# 的总掺量,达到了 11.5%,但其软化点仍比 1# 小 2.5 ℃。对比岩沥青掺量:1# (2.5%) 小于 3# (7.5%);对比 SBS 改性剂掺量:1# (5%) 大于 3# (4%)。说明 SBS 改性剂对改性沥青高温稳定性的提升效果占主要部分。

4.4 60 ℃ 动力黏度试验分析

60 ℃ 动力黏度是高黏沥青的控制性核心指标,该指标合格与否,决定了能否成功开发出合格的改性高黏沥青。试验采用 SYD-0620A 真空减压毛细管黏度仪,试验结果如表 13 和图 3 所示。

表 13 60 ℃ 动力黏度试验结果
Table 13 The test result of 60 degrees dynamic viscosity

编号	1#	2#	3#	4#	5#	成品高黏	高黏指标
黏度/(Pa·s)	18 692	25 162	20 134	30 651	54 138	44 382	> 20 000

由表 13 可知,改性沥青 1# 样品的动力黏度为 18 692 Pa·s,略小于合格指标($> 20 000$ Pa·s);2#、3#、4#、5# 的动力黏度分别为 25 162 Pa·s、20 134 Pa·s、30 651 Pa·s、54 138 Pa·s 均大于高黏合格指标。由表 7 可知,改性剂总掺量由小到大的排列顺序为:1# < 2# < 3# < 4# < 5#,而动力黏度由小到大的排列顺序为:1# < 2# < 3# < 4# < 5#,对动力黏度与改性剂复合掺量进行线性拟合,拟合决定系数为 0.826。该线

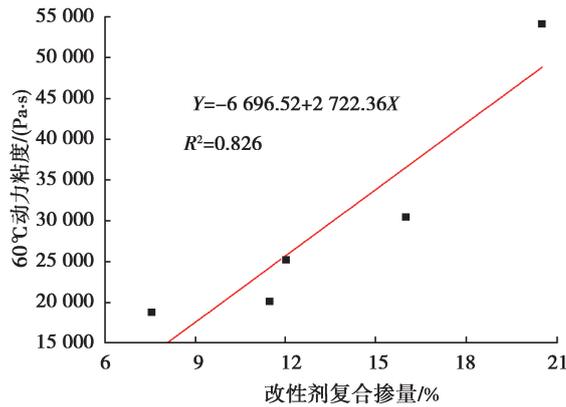


图 3 动力黏度与复合掺量的关系

Fig. 3 Relationship between dynamic viscosity and content of compound modifier

性拟合关系成立,具有良好的相关性,说明基质沥青增加黏性的程度受复合改性剂的总掺量的控制。

4.5 旋转黏度试验及分析

测试不同温度条件下沥青的表观粘度由 Brookfield 黏度试验测试。仪器为 NDJ-1F 布氏黏度计。在 120 °C、135 °C、170 °C 时的复合改性沥青的 Brookfield 黏度测量以评估复合改性沥青的黏弹性性质。试验结果如表 14 和图 4 所示。

表 14 布氏黏度试验结果

Table 14 The test result of Brookfield viscosity

编号	1#	2#	3#	4#	5#	成品高黏	高黏指标
120 °C/(Pa·s)	5.40	6.81	6.72	7.02	8.94	5.98	
135 °C/(Pa·s)	2.50	2.89	2.61	4.08	6.37	2.50	135 °C 布氏黏度 < 3
170 °C/(Pa·s)	0.43	0.88	0.54	1.29	1.75	0.55	

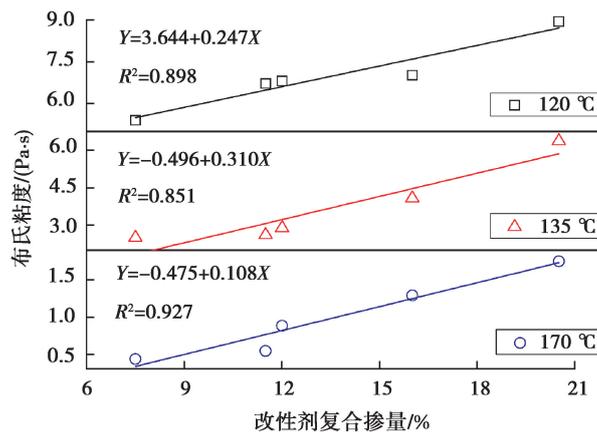


图 4 布氏黏度与复合掺量的关系

Fig. 4 The relationship between Brookfield viscosity and composite content

由表 14 可知,1#、2#、3# 135 °C 布氏黏度分别为 2.5 Pa·s、2.89 Pa·s、2.61 Pa·s,与成品高黏沥青相比其布氏黏度非常接近,均满足合格标准(<3 Pa·s)。4#、5# 135 °C 布氏黏度分别为 4.08 Pa·s、6.37 Pa·s 均不满足高黏沥青的合格标准(<3 Pa·s)。复合掺量由大到小排序为:5# > 4# > 2# > 3# > 1#,而 135 °C 布氏黏度由大到小排序为:5# > 4# > 2# > 3# > 1#,对布氏黏度与改性剂复合掺量进行线

性拟合,在 120 °C、135 °C、170 °C 的温度下的拟合决定系数分别为 0.898、0.851、0.927,表明在不同温度下布氏黏度与改性剂的复合掺量呈良好的线性关系。同时,基质沥青的黏性增加均受这 2 种改性剂的影响,这与 60 °C 动力黏度的试验结果具有相同的特性。

基于温度 120 °C、135 °C、170 °C,通过 1# ~5# 试验组已测定的表观粘度,并根据式(3)、式(4)分别建立粘温关系曲线,计算出粘温指数 VTS,如表 15 所示。

$$\lg(T + 273.13) = N - M[\lg(\lg A)], \quad (3)$$

$$VTS = \frac{\lg(\lg A_1) - \lg(\lg A_2)}{\lg(T_1 + 273.13) - \lg(T_2 + 273.13)}, \quad (4)$$

式中: N 、 M 为系数; T 为试验温度,°C; VTS 为粘温指数; A_1 、 A_2 为 170 °C、120 °C 对应的黏度值/ $\text{Pa} \cdot \text{s}$; T_1 、 T_2 分别为 170 °C、120 °C。

表 15 粘温关系曲线表

Table 15 Viscosity-temperature relation curve table

编号	布氏黏度		VTS
	回归方程	决定系数 R^2	
1#	$\lg(T + 273.13) = 8.1844 - 2.9329 \lg(\lg A)$	0.998	- 2.91
2#	$\lg(T + 273.13) = 5.0540 - 1.7317 \lg(\lg A)$	0.985	- 1.69
3#	$\lg(T + 273.13) = 7.8426 - 2.7987 \lg(\lg A)$	0.999	- 2.81
4#	$\lg(T + 273.13) = 5.2030 - 1.7797 \lg(\lg A)$	0.999	- 1.77
5#	$\lg(T + 273.13) = 5.0054 - 1.6975 \lg(\lg A)$	0.984	- 1.65
成品高粘	$\lg(T + 273.13) = 7.4997 - 2.6685 \lg(\lg A)$	0.999	- 2.68

由表 15 可知,复合改性沥青 1#、2#、3#、4#、5# 的粘温关系曲线的决定系数分别为 0.998、0.985、0.999、0.999、0.984,说明 1# ~5# 试验组所拟合的粘温关系曲线均显著成立。根据粘温指数 VTS 可知,其中 2#、4#、5# 的粘温指数分别为 -1.69、-1.77、-1.65,其值均大于成品高黏沥青(-2.68);而 1#、3# 的粘温指数分别为 -2.91、-2.81,其值与成品高黏沥青非常接近,进一步说明基质沥青增加黏性的程度均受 2 种改性剂的掺量所控制,但其黏弹性变化与两因素掺量的关系不明显。

4.6 DSR 试验分析

动态剪切流变仪(DSR)可测定改性沥青的高温抗车辙性能,研究改性沥青的黏弹特性。采用 GEMANI-3 型动态剪切流变仪(由英国马尔文设备有限公司制造),进行 PG 分级试验获取改性沥青的相关高温性能指标。试验条件: $G^* / \sin \delta < 1.0 \text{ kPa}$,试验结果如表 16 所示和图 5 所示。

表 16 DSR 试验结果

Table 16 The test results of DSR

编号	试验温度 /°C	角频率 / ($\text{r} \cdot \text{s}^{-1}$)	相位角 / (°)	复数剪切模量 / Pa	抗车辙因子 / Pa
1#	88	10	72.96	1230.1	1286.59
2#	88	10	71.51	2724.08	2872.33
3#	88	10	81.21	1509.28	1527.23
4#	88	10	72.32	3018.33	3167.88
5#	88	10	70.36	5315.7	5644.1
成品高黏	88	10	40.12	1763.23	2736.3

由 DSR 试验结果可得,1# ~5# 改性高黏沥青与成品高黏沥青的抗车辙因子与温度之间的关系图,结果如图 5 所示。

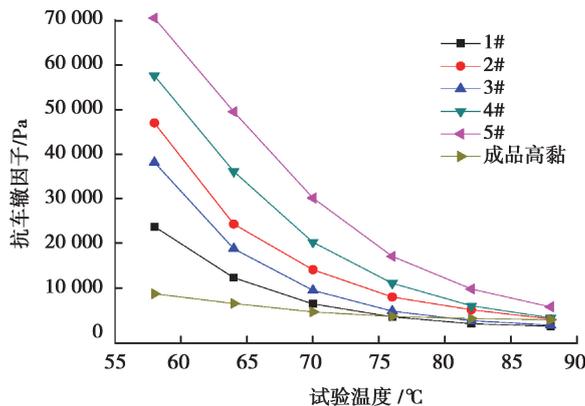


图 5 不同沥青温度—抗车辙因子图

Fig. 5 Different asphalt temperature—anti-rutting factor diagram

通过拟合计算获得各自曲线的函数方程式,以及临界温度值,如表 17 所示。

表 17 不同沥青温度与抗车辙因子函数表

Table 17 Different asphalt temperature and anti-rutting factor function table

沥青种类	函数关系	决定系数	临界温度/°C
1#	$Y = 7 \times e^{-0.099X} \times 10^6$	0.993 4	89.4
2#	$Y = 9 \times e^{-0.092X} \times 10^6$	0.997 4	98.9
3#	$Y = 20 \times e^{-0.108X} \times 10^6$	0.996 9	91.7
4#	$Y = 20 \times e^{-0.102X} \times 10^6$	0.999 8	97.1
5#	$Y = 20 \times e^{-0.091X} \times 10^6$	0.999 5	108.8
成品高黏	$Y = 55\ 755 \times e^{-0.092X}$	0.940 6	114.8

由表 16 和图 5 可知,复合改性沥青 1#、2#、3#、4#、5# 样品在 58 °C 抗车辙因子时,分别为 23 644.8 Pa、46 947.3 Pa、38 147.6 Pa、57 569.2 Pa、70 532.6 Pa,远远高于成品高黏沥青的抗车辙因子(8 542.9 Pa),说明通过 2 种改性剂的复合改性作用能够使改性沥青具有较好的高温性能。但在试验终止温度 88 °C 时,1# 与 3# 样品的抗车辙因子(分别为 1 286.59 Pa、1 527.23 Pa)均小于成品高黏沥青(2 736.3 Pa),2# 与 4# 样品的抗车辙因子(分别为 2 872.33 Pa、3 167.88 Pa)接近于成品高黏沥青,说明改性高黏沥青其抗车辙因子随温度变化更敏感,而 5# 样品的抗车辙因子(5644.1 Pa)几乎是成品高黏沥青的 2 倍,表明 5# 的高温性能更优。由表 17 可知,1# ~5# 样品的临界温度分别为 89.4 °C、98.9 °C、91.7 °C、97.1 °C、108.8 °C 均小于成品高黏沥青的临界温度(114.8 °C),其中,5# 样品与成品高黏沥青的临界温度相接近,表明 5# 样品的高温性能更优。由此可知,改性沥青的抗车辙因子和临界温度受复合改性剂总掺量的控制,其控制关系为正相关。

综上所述,推测岩沥青与 SBS 改性剂的材料复合掺量分别接近 5.0% 与 7.0%。

5 最佳配比求解

选取针入度(Y_1)、延度(Y_2)、软化点(Y_3)、60 °C 动力黏度(Y_4)和布氏黏度(Y_5)作为基本性能指标,选取岩沥青的掺量(X_1)与 SBS 改性剂的掺量(X_2)作为影响作用指标,并运用 SPSS 软件建立的数学回归模型;

采用高黏沥青性能的合格指标作为约束条件,建立计算模型,最后运用 MATLAB 软件求解,并结合试验的实际情况,得到最佳复合改性高黏沥青的材料组成。

5.1 回归模型的建立

由于复合改性的作用效力是由各自因素(X_1 、 X_2)单独作用以及耦合作用共同形成,则其相应的改性沥青的指标与其设计因素之间的函数关系,如式(5)所示;其数学函数关系通式,如式(6)所示。

$$Y = f(X_1) + f(X_2) + KX_1X_2, \tag{5}$$

$$Y = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^n K_{ji}X_j^i + K_{n+1}X_1X_2 + K_{n+2}, \tag{6}$$

式中: $f(X_i) = \sum K_iX_i + K_{n+1}$ 。 Y 为基本指标; X 为影响作用指标; $f(X_1)$ 为岩沥青掺量的作用效力; $f(X_2)$ 为 SBS 改性剂掺量的作用效力; K 为常数项。

通过实际试验与回归模型对比,当 $n = 1$ 时,表示改性沥青基本性能受单因素的影响;当 $n \geq 2$ 时,表示改性沥青基本性能受综合因素(大于等于双因素)的影响。该试验中因素水平为 2 个,又存在单因素影响与双因素复合影响,即 $n = 2$,最终回归模型为

$$Y = K_1X_1 + K_2X_2 + K_3X_1X_2 + K_4, \tag{7}$$

式中: Y 为基本指标; X_1 、 X_2 分别对应的岩沥青与 SBS 的掺量; K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 为常数。

根据式(7)的数学回归模型,利用 SPSS 软件,对针入度(Y_1)、延度(Y_2)、软化点(Y_3)、60 °C 动力黏度(Y_4)和布氏黏度(Y_5) 5 个指标分别进行函数模型的建立。建模结果如表 18 所示。

表 18 不同指标的回归模型计算结果
Table 18 The results of the regression model of different indexes

指标	回归模型	R^2
针入度	$Y_1 = - 1.156X_1 + 2.583X_2 - 0.212X_1X_2 + 38.361$	0.990
延度	$Y_2 = - 11.628X_1 + 3.245X_2 + 0.567X_1X_2 + 93.408$	0.963
软化点	$Y_3 = - 0.032X_1 + 1.793X_2 + 0.194X_1X_2 + 57.064$	0.927
60 °C 动力黏度	$Y_4 = - 3\ 854.559X_1 - 2\ 980.262X_2 + 938.231X_1X_2 + 31\ 980.172$	0.997
布氏黏度	$Y_5 = - 0.440X_1 - 0.469X_2 + 0.111X_1X_2 + 4.512$	0.998

根据表 18 可知,针入度(Y_1)、延度(Y_2)、软化点(Y_3)、60 °C 动力黏度(Y_4)和布氏黏度(Y_5) 5 个回归模型,决定系数分别为 0.990、0.963、0.927、0.997、0.998,表明各个指标的回归模型均具有较好的拟合度,建立的模型可靠,可用于最佳配比的求解。

5.2 最佳配比的求解

由于在实际计算中,针对非线性函数问题很难得到精确的解,故给出回归模型的限定条件,构建具有良好映射的不等式方程组,通过 MATLAB 软件求解最优解集,同时通过实际试验分析调整,寻找复合改性沥青的最佳材料组成。着重开发基于天然岩沥青与 SBS 改性剂的复合改性高黏沥青,选定高黏沥青各项性能合格指标为计算模型的限定值,如表 19 所示。

表 19 高黏沥青合格指标
Table 19 Qualified index of high viscosity asphalt

性能	针入度/0.1 mm	延度/cm	软化点/°C	动力黏度/(Pa·s)	布氏黏度/(Pa·s)
高黏沥青指标	> 40	> 50	> 80	> 20 000	≤ 3

根据该限定条件进行计算时,存在无解的情况,可对其中一个或几个限定条件进行适当调整,使得方程组既有解也不至于解集区域过大。现根据实际试验结果对限定条件进行优化,由第 4 部分的试验分析,推测了岩沥青与 SBS 改性剂的接近掺量,并且最接近的掺配组为 2# 样品,分析 2# 样品的限定性条件,发现除了

软化点指标以外,其余限定条件均满足高黏沥青的标准,故对软化点指标的限定条件进行调整,即调整为大于 45 ℃,其他限定条件不变。其非线性不等式方程组如式(8)所示。

$$\begin{cases} Y_1 = -1.156X_1 + 2.583X_2 - 0.212X_1X_2 + 38.361 > 40 \\ Y_2 = -11.628X_1 + 3.245X_2 + 0.567X_1X_2 + 93.408 > 50 \\ Y_3 = -0.032X_1 + 1.793X_2 + 0.194X_1X_2 + 57.064 > 45 \\ Y_4 = -3854.559X_1 - 2980.262X_2 + 938.231X_1X_2 + 31980.172 > 20000 \\ Y_5 = -0.440X_1 - 0.469X_2 + 0.111X_1X_2 + 4.5123 \end{cases} \quad (8)$$

式中: X_1 、 X_2 为岩沥青掺量与 SBS 改性剂掺量。

运用 MATLAB 软件对式(8)限定条件下函数回归模型进行求解,其解集图形绘制如图 6 所示。

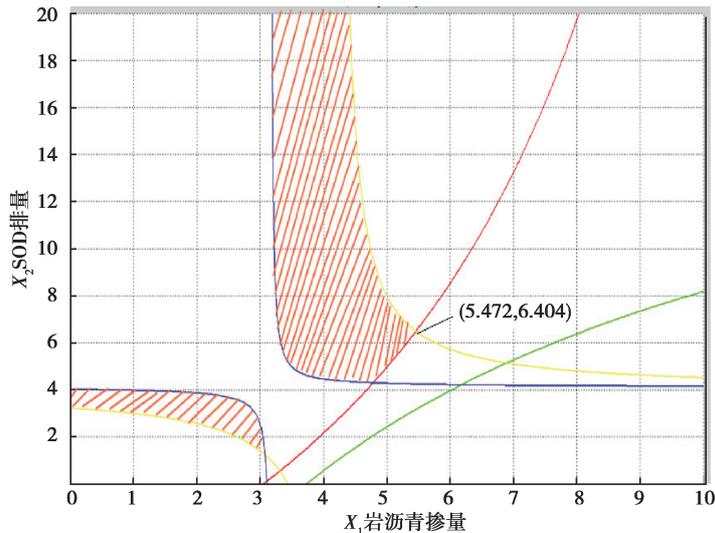


图 6 解的区域

Fig. 6 The region of solution

由于计算时并未给出目标函数,符合限定条件的解具有无数组。通过因素分析可知,结果存在于内插所得,限定在实际试验中岩沥青的掺量和 SBS 改性剂的掺量分别在 2.5% ~ 12.5%、4% ~ 8% 范围内取得。综合考虑 2 个因素材料的生产成本,岩沥青相比 SBS 改性剂来说更具有价格优势,当岩沥青用量越高时,性价比越高。根据图 6 可知,在交点处,存在岩沥青掺量的最大控制值为 5.472%,故最佳配比组合应在交点附近选取,考虑实际操作情况,岩沥青的掺量为 5.4%,SBS 改性剂的掺量为 6.4%,其材料配比组成也符合前期的预测结果。

5.3 最佳配比下的性能验证

验证最佳配比下高黏沥青的各项性能指标,将模型计算出的材料配比结果代入不同指标的回归模型可得到预测值,根据最佳配比制备复合改性高黏沥青,并测试其各项指标与预测值进行对比,结果如表 20 所示。

表 20 最佳配方下的沥青性能

Table 20 Asphalt performance under the optimum ratio

项目	预测值	实测值	误差率/%
针入度/0.1 mm	41.3	42.6	3.0
延度/cm	71	75	5.3
软化点/℃	75.1	83	9.5
60 ℃ 动力黏度/(Pa · s)	24 517	25 832	5.1
布氏黏度/(Pa · s)	2.97	2.95	0.7

根据表20可知,最佳配比下的高黏沥青 $Y_1 \sim Y_5$ 的5项指标预测值的误差分别为3%、5.3%、9.5%、5.1%、0.7%,误差控制均在10%以内,且各项性能指标均满足高黏沥青的标准,说明了建立的回归模型具有可靠性和有效性。

6 结 论

1)复合改性高黏沥青的针入度与延度,天然岩沥青掺量的影响率大于SBS改性剂掺量。

2)复合改性高黏沥青的软化点,天然沥青掺量的影响率小于SBS改性剂掺量。

3)复合改性高黏沥青的动力黏度、布氏黏度、抗车辙因子以及临界温度,各项指标均与复合改性剂总掺量呈正相关关系。

4)复合改性高黏沥青的最佳改性剂材料配比:岩沥青掺量为5.4%,SBS改性剂掺量为6.4%。

参考文献:

- [1] 周富强,周必功,李保国,等.岩沥青改性沥青应用研究[J].公路,2006,51(12):140-142.
Zhou F Q, Zhou B G, Li B G, et al. Study on the application of asphalt modified bitumen[J]. Highway, 2006, 51(12): 140-142. (in Chinese)
- [2] 叶奋,杨思远.复合改性高黏沥青在排水路面的应用研究[J].华东交通大学学报,2016,33(1):30-36.
Ye F, Yang S Y. Research on application of composite modified high viscosity asphalt in drainage pavement[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2016, 33(1): 30-36. (in Chinese)
- [3] 陆兆峰,何兆益,黄刚.天然岩沥青改性沥青性能及改性机理研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2011,35(6):1161-1164,1169.
Lu Z F, He Z Y, Huang G. Study on performance and modification mechanism of modified asphalt by native rock-asphalt [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science&Engineering), 2011, 35(6): 1161-1164, 1169. (in Chinese)
- [4] 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.
Xiong Z J, Cheng J L, Deng C, et al. Study of pavement performance of high viscosity modifier in asphalt and OGFC mixture[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2017, 38(5): 94-97. (in Chinese)
- [5] 樊亮,申全军,张燕燕.天然岩沥青改性对沥青路面性能的影响[J].建筑材料学报,2007,10(6):740-744.
Fan L, Shen Q J, Zhang Y Y. Influence of performance of modified asphalt by native rock-asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(6): 740-744. (in Chinese)
- [6] 宋国森.不同掺配工艺对天然岩沥青改性沥青混合料路用性能的影响[J].现代交通技术,2007,4(3):12-14.
Song G S. Effects of manufacturing process of different modified asphalt on mixture properties[J]. Modern Transportation Technology, 2007, 4(3): 12-14. (in Chinese)
- [7] González O, Muñoz M E, Santamaría A, et al. Rheology and stability of bitumen/EVA blends[J]. European Polymer Journal, 2004, 40(10): 2365-2372.
- [8] 张铁志,赵鹏.布敦岩沥青作为改性剂的SMA混合料试验研究[J].公路,2016,61(7):240-243.
Zhang T Z, Zhao P. Experimental study on SMA mixture of budunsel rock asphalt used as modifier[J]. Highway, 2016, 61(7): 240-243. (in Chinese)
- [9] 罗望群.岩沥青改性沥青混合料路用性能试验研究[J].石油沥青,2016,30(1):43-46.
Luo W Q. Experimental study on road performance of rock asphalt modified asphalt mixture[J]. Petroleum Asphalt, 2016, 30(1): 43-46. (in Chinese)
- [10] 柳浩,王建国,石效民.千里达湖天然沥青改性国产重交通沥青的路用性能研究[J].石油沥青,2001,15(2):41-42.
Liu H, Wang J G, Shi X M. Study on performance of modified bitumen by trinidad lake asphalt[J]. Petroleum Asphalt, 2001, 15(2): 41-42. (in Chinese)
- [11] 吴旷怀,伦兴.添加北美岩沥青的混合料路用性能试验研究[J].公路,2006,51(8):167-172.
Wu K H, Lun X. Experimental research on road performance of Gilsonite modified asphalt mixtures[J]. Highway, 2006, 51(8): 167-172. (in Chinese)

- [12] 钟科, 曹东伟, 刘清泉. 新疆岩沥青改性沥青混合料配合比设计及工程应用[J]. 公路, 2007, 52(7): 173-176.
Zhong K, Cao D W, Liu Q Q. Mix proportion design and engineering application of modified asphalt mixture of Xinjiang rock bitumen[J]. Highway, 2007, 52(7): 173-176. (in Chinese)
- [13] 黄刚, 何兆益, 胡诚, 等. 基于微观和流变分析的岩沥青改性沥青性能评价[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(2): 367-372.
Huang G, He Z Y, Hu C, et al. Performance evaluation of rock modified asphalt based on analysis of microstructure and rheological property[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2010, 40(2): 367-372. (in Chinese)
- [14] 陈华鑫, 王秉纲. 基质沥青和 SBS 改性剂的相互作用机理分析[J]. 公路, 2007, 52(2): 134-138.
Chen H X, Wang B G. Analysis of interaction mechanism between base asphalt and SBS polymer[J]. Highway, 2007, 52(2): 134-138. (in Chinese)
- [15] 尚晓峰. BRA 岩沥青与 SBS 复合改性沥青及其混合料性能研究[J]. 公路工程, 2016, 41(4): 78-83,101.
Shang X F. Study on durability of BRA and SBS compound modified asphalt and its mixture[J]. Central South Highway Engineering, 2016, 41(4): 78-83,101. (in Chinese)
- [16] 姜庆林. SBS 改性剂与基质沥青的配伍性研究[J]. 公路, 2006, 51(2): 161-163.
Jiang Q L. Study on compatibility of SBS polymer and asphalt[J]. Highway, 2006, 51(2): 161-163. (in Chinese)
- [17] 刘少鹏, 黄卫东, 纪淑贞, 等. 高掺量 SBS 改性沥青及其在 OGFC 中的应用[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2013, 10(3): 20-25,72.
Liu S P, Huang W D, Ji S Z, et al. Application of modified asphalt using high dosage SBS in OGFC[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2013, 10(3): 20-25,72. (in Chinese)
- [18] 弓锐, 弥海晨. SBS 改性剂对改性乳化沥青性能影响研究[J]. 石油沥青, 2017, 31(5): 1-3.
Gong R, Mi H C. The influence of SBS modifier on the performance of modified emulsified asphalt[J]. Petroleum Asphalt, 2017, 31(5): 1-3. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)