

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.04.047

# 高黏改性沥青的开发与性能评价

贾利强<sup>1</sup>, 刘俊斌<sup>2</sup>, 李平<sup>2</sup>

(1. 广西交通投资集团有限公司, 广西 南宁 530022; 2. 长沙理工大学)

**摘要:**为开发新型基于 SBS 的高性价比高黏改性沥青,通过针入度、软化点、延度及 60℃ 动力黏度试验研究 SBS、SBR、C9 石油树脂、硫磺掺量对沥青性能的影响情况。研究发现: SBS 在改善沥青高低温性能的同时,对沥青的黏度有所提升;SBR 掺量增加降低沥青黏度,但有助于提高沥青低温性能;增加 C9 石油树脂掺量可提高沥青黏度且对沥青高低温性能无明显影响;硫磺对沥青性能影响较小;最终推荐改性沥青配方为 5% SBS+2% SBR+7% C9 石油树脂+0.8% 硫磺;通过渗水试验、车辙试验、低温弯曲试验及浸水马歇尔试验研究高黏改性沥青混合料的使用性能,证明使用开发的高黏改性沥青制备的混合料使用性能满足规范要求。

**关键词:** 沥青; 高黏改性剂; 组分配比; 性能评价

## 1 前言

排水沥青路面具备良好的排水、降噪、抗滑等性能,广泛应用于高速公路和快速化道路。相比其他密级配沥青混合料,排水沥青混合料矿料级配主要由粗集料嵌挤组成,细集料和填料较少,具有大空隙特点(空隙率高达 15%~25%),如何保证矿料间的有效黏附是排水沥青混合料的使用关键所在。高黏沥青作为一种黏、韧性良好的胶结料,与集料黏结裹覆效果较好,在沥青胶结料受到阳光、空气和雨水等不利因素影响下,保证排水沥青混合料具有足够的高温稳定性、低温抗裂性与水稳定性。因而开发高性能高黏改性沥青并系统测试改性沥青及混合料的使用性能,对排水路面的推广应用具有重要意义。

日本经过多年研制开发出性能优良的 TPS(热塑性橡胶粉为主要成分)高黏沥青,韩国 SK 公司随后研发了 SK 高黏沥青,中国早期多以进口 TPS 改性剂制得高黏沥青,随着研究的深入研发了诸如深圳海川 SINOTPS、安丰 AF-FN、东道 DTSP-P 等高黏沥青,其中日本 TPS 和深圳海川 SINOTPS 高黏沥青因其高温性能与水稳性能良好且方便施工应用最为广泛,但单价高、掺量大、储存稳定性差,低温抗裂性存在一

定缺陷,推广应用也受到一定限制。由此大量学者对基于 SBS 高黏改性沥青性能进行了研究, Lsacsson Ulf 研究发现,随着 SBS 聚合物含量的增加,改性沥青的动力黏度随之提高;刘少鹏对比不同掺量 SBS 高黏沥青与 TPS 高黏沥青性能发现,提高 SBS 掺量才能追赶 TPS 高黏沥青性能,以 6% SBS 掺量最为合适;杨凯对比 SBS-SBR 复合改性与 SBS、SBR 单一改性高黏沥青的性能发现,复合改性可显著提高沥青高低温性能;丛玉凤对比 SBS-C9 石油树脂改性沥青与 SBS 改性沥青的性能发现,SBS-C9 石油树脂改性沥青的感温性能、高温性能优于 SBS 改性沥青,而低温性能、抗老化性能与之相差不大;Zhang Feng 采用 6% SBS+4% 增塑剂+0.2% 交联剂制备高黏改性沥青并进行沥青性能研究,发现 SBS 对沥青性能影响最为显著,增塑剂促使 SBS 的溶胀和分散,交联剂主要改善沥青的抗老化性能;祝斯月研发一种 7% SBS+3% 相容剂+0.2% 稳定剂的高黏改性沥青,与 TPS 高黏沥青、SBS 改性沥青性能进行对比发现,自主研制高黏改性沥青温度敏感性较低,低温抗裂性与存储稳定性较好;Chen Shuanfa 对 7% SBS 聚合物+3% 相容剂+2% 稳定剂的高黏改性沥青进行性能研究,发现其具有良好的低温延度、高黏度与高韧性。高黏改性沥青应用于实际工程前必然要进行混合料室内试验研究,

收稿日期:2020-04-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51878075);广西科技重大专项(编号:桂科 AA18242032);广西重点研发计划项目(编号:桂科 AB19245019)

作者简介:贾利强,男,硕士,高级工程师,E-mail:718699610@qq.com

Yaofei Luo 通过车辙试验、汉堡车辙试验、低温弯曲试验评价不同高黏改性沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性; Ziming Liu 通过车辙试验、三点弯曲梁试验、冻融劈裂试验研究不同高黏沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性; Ke Zhong 以车辙试验、三点弯曲梁试验、TSR 试验对 TPS+SBS 高黏改性沥青的高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性进行评价。

综上所述,基于 SBS 开发高黏沥青已成为研究的热点,但单一 SBS 聚合物改性存在高掺量才能满足黏度要求,对低温性能关注不足等问题,因而可以尝试多种聚合物进行改性复配高黏沥青,以实现技术和经济的协调。因此该文基于四因素四水平正交试验设计,以针入度、软化点、延度及 60 °C 动力黏度为评价指标

探究不同改性剂材料对沥青性能的影响,并对 4 种材料的掺配比进行优化,对制备的新型高黏改性沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性以及排水性能进行评价,从多指标、多角度分析基于 SBS 高黏改性沥青的性能,为后续高黏改性沥青的复配研究提供参考。

## 2 原材料

选用东海牌 70<sup>#</sup> 基质沥青,其主要技术指标如表 1 所示。

试验选用的 4 种改性剂分别为 YH-792 型 SBS 改性剂, SBR 粉末, C9 石油树脂, 硫磺。主要性能指标见表 2~5。

表 1 基质沥青技术指标

试验项目	单位	测试结果	技术要求	试验方法
针入度(25 °C, 5 s, 100 g)	0.1 mm	66	60~80	T0604
软化点( $T_{R\&B}$ )	°C	47.9	46	T0606
15 °C 延度	cm	100	100	T0605
闪点	°C	279	260	T0611
溶解度	%	99.9	99.5	T0607
相对密度(25 °C)		1.033	实测记录	T0603
质量变化	%	-0.403	0.8	T0610
RTFOT 后残留物				
残留针入度比(25 °C)	%	70	61	T0604
残留延度(10 °C)	cm	14	6	T0605

注:根据 JTG F40-2004《公路沥青路面施工技术规范》中道路石油沥青技术要求 A 级 70<sup>#</sup> 沥青,气候分区 1-3-2 确定。

表 2 SBS 技术性能指标

项目	单位	测试结果	测试方法
熔融流动指数	g/min	1	ASTM D-1238
比重		0.94	ISO 2781
拉伸强度	kg/cm <sup>2</sup>	250	ASTM D-412
拉伸应力	kg/cm <sup>2</sup>	24	ASTM D-412
伸长率	%	800	ASTM D-412
硬度		77	ASTM D-2240
油含量	W <sub>t</sub> /%		KKPC
溶液黏度(25%甲苯)	cps	4 500	ASTM D445
苯乙烯含量	W <sub>t</sub> /%	30	IR
挥发分	W <sub>t</sub> /%	0.5	ASTM D-1416

表 3 SBR 技术性能指标

项目	单位	测试结果	技术要求	测试方法
颜色		乳白色粉状		目测
丁二烯	%	70	68~71	GB 12824-91
门尼黏度	度	52	50~53	GB 12824-91
细度通过	目	20	10 或 20	GB 12824-91
苯乙烯	%	23.5	23.5	GB 12824-91
挥发	%	0.2	0.8	GB 12824-91
灰分	%	6~7.5	4~8	GB 12824-91
拉伸强度	MPa	26.5	26	GB-8655-88
扯断伸长率	%	540	500	GB-8655-88
皂含量	%	0.15	0.5	GB 12824-91
有机酸含量	%	6.3	6.3	GB 12824-91

表 4 C9 石油树脂技术指标

项目	单位	测试结果	技术要求	测试方法
外观		粒状		目测
色号		7	6~8	ASTMD-1544
软化点	℃	104	100~110	ASTM E28-58
酸值	mgKOH/g	0.8	1.0	ASTM D-974
灰分	%	0.09	0.1	ETM-E-99
溴值	gBr/(100 g)	110	70~140	HG 2231-91-A

表 5 硫磺技术性能指标

项目	单位	测试结果	技术要求
硫(S)含量	%	99.9	99.98
灰分	%	0.03	0.008 6
酸度(H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	%	0.003	0.002 4
有机物	%	0.03	0.006 8
砷(AS)含量	%	0.000 1	0.000 1
水分	%	0.10	0.02
细度(通过 235 目试验筛)	%	—	95

### 3 高黏沥青组分配比研究

由于 SBS 可促使沥青形成有机的高分子弹性体,致使沥青性能得到改善,SBR 有助于提高沥青的形变能力,C9 石油树脂可以提高沥青的黏度,硫磺可以与 SBS、SBR 发生交联反应,形成硫化的大分子网络结构,提高沥青弹性的同时保持一定的塑性。为此,该文选择 SBS、SBR、C9 石油树脂、硫磺进行复配高黏沥青。首先将基质沥青加热至 170 ℃,称取好的 SBS、SBR 和石油树脂加入基质沥青中用玻璃棒搅拌;待搅拌均匀后用高速剪切机剪切 60 min,剪切速率为 4 500 r/min,剪切完成后,加入硫磺再以相同的速率剪切 30 min;将制备好的高黏沥青在 170 ℃环境中溶胀 30 min。

该文基于四因素四水平正交设计 L<sub>16</sub>(4<sup>4</sup>)进行针入度、软化点、5 ℃延度与 60 ℃动力黏度试验,同时结合 JTG F40-2004《公路沥青路面施工技术规范》中高黏改性沥青的技术要求,以探究合理的材料掺配比,正交试验结果见表 6,表中各掺量均为沥青的质量分数。

表 6 正交试验结果

试验 编号	SBS 掺量/%	SBR 掺量/%	C9 石油树 脂掺量/%	硫磺掺 量/%	针入度/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	5 ℃ 延度/cm	60 ℃动力黏 度/(Pa·s)
1	3	2	3	0.2	52.7	70.1	29.3	17 250
2	3	3	5	0.4	48.3	74.5	34.6	18 654
3	3	4	7	0.6	47.5	78.6	36.3	19 432
4	3	5	9	0.8	46.9	79.7	39.2	22 327
5	4	2	5	0.6	43.5	76.7	32.9	19 004
6	4	3	3	0.8	46.5	81.2	35.1	17 975
7	4	4	9	0.2	42.4	76.7	38.1	23 479
8	4	5	7	0.4	42.2	80.9	44.8	20 046
9	5	2	7	0.8	41.9	84.5	36.3	26 567
10	5	3	9	0.6	40.1	85.3	38.7	25 132
11	5	4	3	0.4	42.3	83.3	40.7	19 822
12	5	5	5	0.2	40.5	82.3	42.9	21 763
13	6	2	9	0.4	36.2	85.7	37.6	28 249
14	6	3	7	0.2	37.1	84.2	42.3	27 543
15	6	4	5	0.8	38.8	86.8	43.6	22 174
16	6	5	3	0.6	39.0	84.3	47.5	20 058
高黏改性沥青的技术要求					40	80		20 000

#### 3.1 各组分对高温性能的影响

和值分析法是将各水平试验结果相加,用以表征

该水平整体对试验指标的影响趋势,将各水平和值绘制折线图,可分析研究水平因素变化对试验指标的影

响。为此,该文采用针入度及软化点的和值,分析不同因素在不同水平下沥青高温性能的变化趋势,结果如图1、2所示。

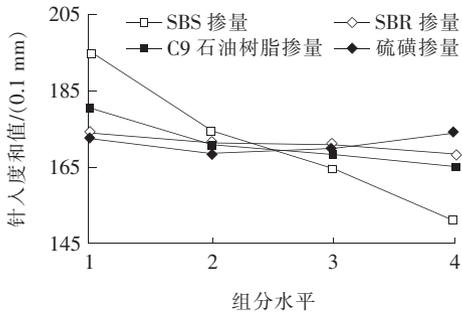


图1 不同组分不同水平下针入度变化趋势

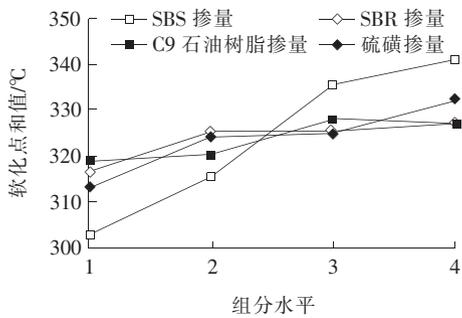


图2 不同组分不同水平下软化点变化

由图1、2可知:

(1) 综合针入度和软化点两个指标可以看出, SBS可以显著提高沥青的高温性能。SBS掺量增加, 沥青针入度下降明显, 软化点提高显著。这是因为SBS以物理交联的网状结构存在沥青中, SBS微粒吸收沥青中的油分, 沥青质则存在于网孔中, 最终提高沥青的高温性能。

(2) SBR对沥青的高温性能改善不明显。SBR掺量增加, 沥青针入度缓慢减小, 软化点略有提高。

(3) C9石油树脂、硫磺可小幅提升沥青的高温性能。C9石油树脂掺量增加, 沥青针入度逐渐降低; C9石油树脂掺量从3%增加至5%, 软化点提高, 其可能是石油树脂的增加, 大分子共聚物含量提高使得交联作用增强。硫磺掺量增加, 沥青针入度基本不变, 软化点逐渐提高, 其可能是由于硫磺作为稳定剂, 与SBS发生了交联反应, 降低了聚合物相与基质沥青相界面的表面张力, 增大了沥青的黏度, 进而表现为沥青的高温性能略有提升。

### 3.2 各组分对低温性能的影响

采用5℃延度指标的和值对不同水平下沥青低温性能的变化趋势进行分析, 结果如图3所示。

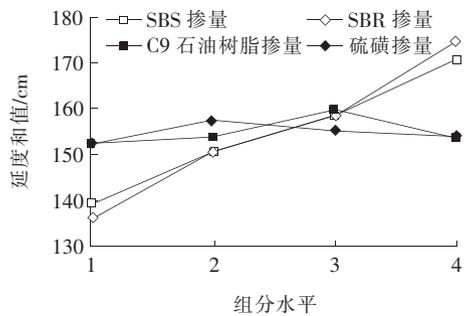


图3 不同组分不同水平下延度变化趋势

由图3可知:

(1) SBS、SBR可以显著提高沥青的低温性能。SBS掺量增加, 沥青的延度和值从139.4 cm增加至171 cm。表明SBS中聚苯乙烯嵌段硬化形成网状结构, 沥青进入网状结构中, 形成一个有机高分子弹性体, 使沥青低温性能得到改善。SBR掺量增加, 沥青的延度和值从136.1 cm增加至174.7 cm。这可能是由于SBR有选择性地对沥青组分进行吸附, 在丁苯橡胶颗粒界面形成吸附层, 提高了沥青的形变能力, 因此使得沥青的低温性能提高。

(2) C9石油树脂、硫磺对沥青的低温性能没有明显影响。C9石油树脂掺量增加, 沥青延度和值基本不变。其可能是由于此时石油树脂与沥青形成了网络结构, 树脂的黏性起主导作用, 但总体还是改性沥青低温脆性的影响大于树脂黏性的影响。硫磺掺量从0.2%增加至0.4%, 沥青延度和值从152.6 cm增加至157.7 cm, 而当掺量从0.4%增加至0.8%时, 沥青延度和值从157.7 cm减小至154.2 cm, 总体趋势基本不变。

### 3.3 各组分对黏度的影响

采用60℃动力黏度指标的和值对不同水平下沥青黏度的变化趋势进行分析, 结果如图4所示。

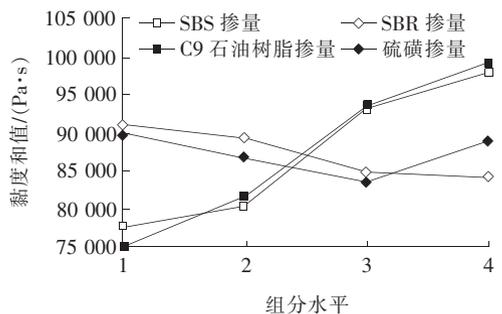


图4 不同组分不同水平下黏度和值

由图4可知:

(1) SBS、C9石油树脂对沥青黏度的提升效果显著。SBS掺量增加, 沥青黏度和值从77 663 Pa·s增

加至 98 024 Pa·s。C9 石油树脂掺量增加,沥青黏度和值从 75 102 Pa·s 增加至 99 187 Pa·s,其可能是由于石油树脂除了内部的交联外,还与沥青发生交联,形成相互贯通的空间网状结构。

(2) SBR 会降低沥青黏度。SBR 掺量增加,黏度和值从 91 070 Pa·s 减小至 84 194 Pa·s。SBR 对沥青的黏度本应有提高作用,出现此现象的原因可能是橡胶颗粒没有均匀分散于沥青所致。

(3) 硫磺对于沥青黏度的影响呈先降低后提高的趋势。硫磺掺量从 0.2% 增加至 0.6%,沥青黏度和值从 90 035 Pa·s 减小至 83 626 Pa·s,而当硫磺掺量从 0.6% 增加至 0.8% 时,沥青黏度和值从 83 626 Pa·s 增加至 890 435 Pa·s,降低与升高趋势同样明显。

### 3.4 材料配比优化

极差分析法可以直观地分析各组分水平对试验指标的影响程度,极差越大,该组分对指标影响程度越大。为了得到各组分对沥青性能的影响程度,采用极差分析方法研究各组分对改性沥青性能的影响,分析结果见表 7。

表 7 各组分对沥青各试验指标影响的极差分析

评价指标	极差(R)			
	针入度/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	5 ℃ 延度/cm	60 ℃动力黏 度/(Pa·s)
SBS 掺量	11.08	9.53	7.90	5 090.25
SBR 掺量	1.43	2.55	9.58	1 719.00
C9 石油树脂掺量	3.73	2.33	1.78	6 020.50
硫磺掺量	1.23	4.73	1.28	1 602.25

方差分析是在极差分析的基础上进一步分析各组分水平对试验结果的影响及各组分水平的优化组合。对正交试验结果进行方差分析,将数据的总变异分解成组分引起的变异和误差引起的变异两部分,构成  $F$  统计量,做  $F$  检验,显著性取 0.05,临界值为 9.280,大于此值则作用效果显著,反之不显著,分析结果如表 8 所示。

分析表 7、8 得出:

对于沥青高温性能的影响,需同时考虑针入度与软化点两个指标,当指标为针入度时,各材料影响程度为:SBS>C9 石油树脂>SBR>硫磺;当指标为软化点时,各材料影响程度为:SBS>硫磺>C9 石油树脂>

SBR。可以看出:SBS 的影响更为显著;对于沥青低温性能的影响,以 5 ℃ 延度作为评价指标,各材料影响程度为:SBR>SBS>C9 石油树脂>硫磺,SBR 和 SBS 作用显著;对于沥青 60 ℃ 动力黏度的影响,各材料影响程度为:C9 石油树脂>SBS>SBR>硫磺,C9 石油树脂和 SBS 作用显著。

表 8 各组分对高黏沥青性能影响的方差分析

评价指标	方差(F)			
	针入度/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	5 ℃ 延度/cm	60 ℃动力黏 度/(Pa·s)
SBS 掺量	118.025	30.293	38.266	25.54
SBR 掺量	1.897	2.218	55.379	2.959
C9 石油树脂掺量	14.025	2.016	2.228	31.905
硫磺掺量	1.859	5.901	1.001	2.139

在确定最优水平组合时,以 60 ℃ 动力黏度评价高黏改性沥青的关键性指标,结合上述分析,SBS 和 C9 石油树脂掺量增加可以提高沥青黏度,SBR 掺量增加降低沥青黏度,硫磺掺量从 0.2% 增加至 0.6%,沥青黏度降低,而当其掺量从 0.6% 增加至 0.8% 时,沥青黏度增加。同时结合沥青针入度、软化点和延度指标,推荐 5% SBS+2% SBR+7% C9 石油树脂+0.8% 硫磺作为最优配方。

## 4 高黏改性沥青混合料路用性能研究

### 4.1 混合料配合比设计

试验采用玄武岩,且粗细集料全部逐级筛分,采用由石灰石磨细得到的矿粉作为填料,技术指标均符合施工技术规范中所处气候分区为 1-3-2 的高速公路、一级公路表面层材料的质量要求。

#### (1) 选定矿料级配

参照 JTG F40-2004《公路沥青路面施工技术规范》中所规定的矿料级配范围,结合目前相关的研究经验,采用目标空隙率为 20% 的 OGFC-13 沥青混合料,矿料级配范围及初定级配见图 5。

#### (2) 确定最佳油石比

选取 4.0%~6.0% 油石比范围,按 0.5% 级差选取 5 种沥青用量,将析漏试验与飞散试验得到的结果分别绘制成损失率与沥青用量的关系曲线图,曲线拐点处的沥青用量即为最大油石比与最小油石比,参照马歇尔试验结果确定最佳油石比。试验得到的关系曲

线见图6,图中两切线的交点即为曲线的拐点。

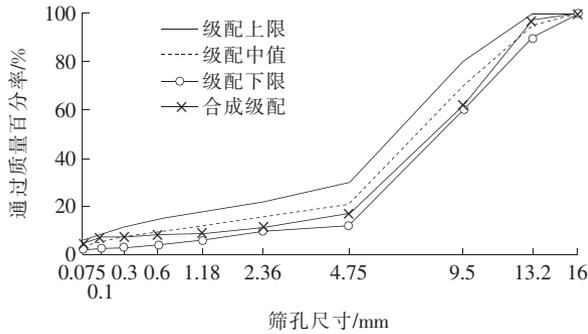
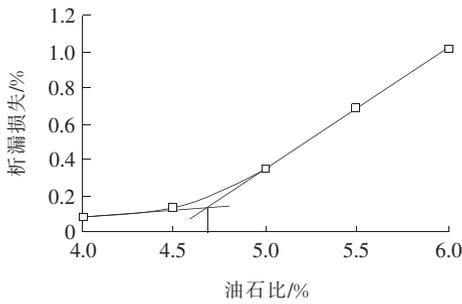
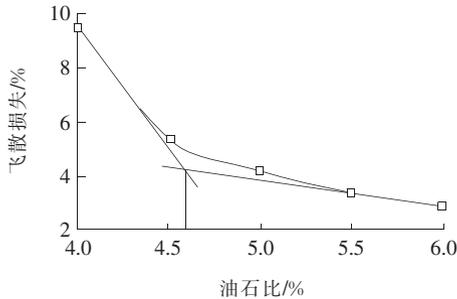


图5 矿料级配范围及级配



(a) 析漏损失率与油石比的关系



(b) 飞散损失率与油石比的关系

图6 高黏改性沥青混合料试验曲线图

由图6可以看出:随着沥青用量的增加,析漏损失随之增加,飞散损失随之减少,析漏损失在4.0%~4.9%油石比范围能够满足规范中小于0.3%的要求,飞散损失在4.0%~6.0%油石比范围均满足规范要求。图6(a)曲线拐点处的油石比为4.7%,即最大油石比 $OAC_{max}=4.7%$ ,图6(b)曲线拐点处的油石比为4.6%,即最小油石比 $OAC_{min}=4.6%$ 。作为一种大空隙率混合料,在混合料设计中其耐久性需重点考虑,沥青最佳用量可在满足析漏损失要求的基础上,选取析漏试验所确定的最大油石比或小一个百分点作为初始最佳油石比, $OAC=4.7%$ 。

根据上述级配和初始最佳油石比拌制混合料,进

行马歇尔试验,试验结果如表9所示,由表9可以看出:混合料各项指标满足JTGF40—2004《公路沥青路面施工技术规范》要求,上述级配确定的初始最佳油石比是合适的。

表9 马歇尔试验结果

项目	油石比/ %	析漏损 失/%	飞散损 失/%	空隙率/ %	稳定度/ kN
试验结果	4.7	0.203	4.7	20.1	5.69
规范要求		0.3	20	18~25	3.5

#### 4.2 试验结果分析

基于前述高黏改性沥青、混合料级配与最佳油石比,制备混合料进行渗水试验、车辙试验、低温弯曲试验、浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验,结果见表10。

表10 高黏改性沥青混合料试验结果

项目	渗水系 数/(mL · min <sup>-1</sup> )	动稳定 度/(次 · mm <sup>-1</sup> )	破坏 应变/ με	残留稳 定度/ %	残留强 度比/ %
实测平 均值	4 052	5 361	3 424	91.8	87.1
规范 要求		1 500(一般 交通路段)、 3 000(重 交通路段)	2 500	85	80

由表10可知:

(1) 高黏改性沥青混合料的渗水性能较好。渗水系数为4 052 mL/min,当沥青路面排水系数大于2 000 mL/min时,渗入沥青路面的水可以在内部孔隙自由流动,达到较好的排水功能。

(2) 高黏改性沥青混合料的高温稳定性较好,抵抗车辙的能力大大增强。动稳定度可以达到5 361次/mm,是规范中对于重交通路段要求的1.79倍。这是因为高温时沥青的黏度越大,在荷载的作用下产生的剪切变形就越小,残留的永久塑性变形也越小。

(3) 高黏改性沥青混合料低温抗变形能力较强。破坏应变为3 424 με,高于规范要求的2 500 με,极限应变的增大意味着变形能力提高,从而表明混合料的低温抗裂性较好。

(4) 高黏改性沥青混合料的水稳定性较好。残留稳定度为91.8%,残留强度比为87.1%,均满足规范

要求。说明改性沥青与矿料有较好的黏结性能,水难以浸入沥青—矿料界面,减少了水损害的发生。

## 5 结 论

通过 SBS、SBR、C9 石油树脂、硫磺复配高黏改性沥青可弥补单一材料改性能力的不足,由此提升高黏沥青的综合技术指标。通过正交试验设计优化 4 种改性材料的掺配比,研究不同材料不同掺量对沥青性能的影响趋势以及材料影响程度和显著性,并对高黏改性沥青混合料的路用性能进行评价,得出以下结论:

(1) 随着 SBS 掺量的增加,沥青的高、低温性能与 60 °C 黏度均显著提高,SBR 掺量的增加可以显著提高沥青的低温性能,而其掺量的增加还可能致使沥青的 60 °C 黏度下降,C9 石油树脂可以明显提高沥青的黏度,硫磺掺量的增加对沥青黏度的影响呈现先负后正趋势。

(2) SBS 对沥青的高低温度性能及 60 °C 黏度影响显著,SBR 仅对沥青低温性能有明显影响,C9 石油树脂对沥青的 60 °C 黏度作用显著且对沥青高低温度性能无明显影响,硫磺作为稳定剂对沥青性能的影响较小。

(3) 对于 SBS、SBR、C9 石油树脂和硫磺 4 种改性材料制备的高黏改性沥青,根据规范要求及分析优选出最佳掺量分别为 5%、2%、7%、0.8%。

(4) 对比高黏改性沥青混合料的规范要求可知,采用新型高黏改性沥青制备的 OGFC 混合料高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性与排水性能优良。

## 参 考 文 献:

[1] 张锐,黄晓明,侯曙光. 新型沥青添加剂 TPS 的性能[J]. 交通运输工程学报,2006(4).

[2] 傅珍,黄振,马峰. 玄武岩纤维对老化沥青混合料路用性能的影响[J]. 材料导报,2016(2).

[3] 张争奇,田中男,黄硕磊,等. SBS—PU 改性高粘高弹沥青材料组成及工艺参数研究[J]. 建筑材料学报,2019.

[4] Lsacsson Ulf L X. Influence of Styrene—Butadiene—Styrene Polymer Modification on Bitumen Viscosity[J]. Fuel,1997,76(14):1 353—1 359.

[5] 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(3).

[6] 杨凯,邢明亮,田俊壮,等. SBS 与 SBR 胶粉复合改性沥青

性能研究[J]. 公路,2016(10).

[7] 丛玉凤,李茂平,徐磊,等. C9 石油树脂改性沥青的研制[J]. 辽宁石油化工大学学报,2015(1).

[8] Zhang F, Hu C. Preparation and Properties of High Viscosity Modified Asphalt[J]. Polymer Composites, 2017, 38(5):936—946.

[9] 祝斯月. 透水性路面高粘改性沥青结合料材料组成与性能研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2012.

[10] Chen S F, Zhu S Y, Qin X T, et al. Material Design and Property of High Viscosity Asphalt Used in Pervious Asphalt Pavement[J]. Advanced Materials Research, 2013, 2 526(1 508):495—499.

[11] Luo Y, Zhang K, Li P, et al. Performance Evaluation of Stone Mastic Asphalt Mixture with Different High Viscosity Modified Asphalt Based on Laboratory Tests[J]. Construction and Building Materials, 2019, 225: 214—222.

[12] Liu Z, Luo S, Quan X, et al. Laboratory Evaluation of Performance of Porous Ultra—Thin Overlay[J]. Construction and Building Materials, 2019, 204:28—40.

[13] Zhong K, Sun M, Chang R. Performance Evaluation of High—Elastic/Salt—Storage Asphalt Mixture Modified with Mafilon and Rubber Particles[J]. Construction and Building Materials, 2018, 193:153—161.

[14] 丛玉凤. 无机材料对 SBS 改性沥青稳定作用的研究[D]. 东北大学博士学位论文,2005.

[15] 丛玉凤,李茂平,黄玮. SBR—C<sub>9</sub> 石油树脂改性沥青的研究[J]. 辽宁石油化工大学学报,2016(1).

[16] 李双瑞,林青,施小芳,等. 不同稳定剂对 SBS 改性沥青稳定效果的对比研究[J]. 公路交通科技,2008(6).

[17] 窦世昌,卢建刚,梁素毅. 常用聚合物(SBS)改性沥青稳定剂添加量的确定[J]. 河北农业大学学报,2008(1).

[18] 纪轶来,张国强,薛文,等. 稳定剂对 SBS 改性沥青性能影响的研究[J]. 河北工业大学学报,2006(6).

[19] 李晟,王沅江. 钢渣透水性水泥混凝土正交试验研究[J]. 中外公路,2016(6).

[20] 李双瑞,林青,董声雄. SBS 改性沥青机理研究进展[J]. 高分子通报,2008(5).

[21] 丛玉凤,李茂平,黄玮. SBR—C<sub>9</sub> 石油树脂改性沥青的研究[J]. 辽宁石油化工大学学报,2016(1).

[22] 王宏斌. 基于正交分析的改性沥青流变学性能试验研究[J]. 施工技术,2015(S2).

[23] 祝斯月,陈拴发,秦先涛,等. 基于灰关联熵分析法的高粘改性沥青关键指标[J]. 材料科学与工程学报,2014(6).