

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.04.054

炎热地区高性能橡胶复合改性高黏沥青 工程适用性研究

谢泽华^{1,2,3}, 吕大春^{1,2,3}, 刘斌清^{1,2,3}(1. 广西交通科学研究院有限公司, 广西 南宁 530007; 2. 广西道路结构与材料重点实验室;
3. 高等级公路建设与养护技术、材料及装备交通运输行业研发中心)

摘要:为了研究炎热地区高性能橡胶复合改性高黏沥青(HRVA)的工程适用性,该文优选国内外两种高黏改性沥青与高性能橡胶复合改性高黏沥青分别进行针入度、软化点、延度、布氏黏度及动态剪切流变仪试验,通过性能对比和优选,根据工程经验对高性能橡胶高黏改性沥青进行配合比设计,在此基础上,对炎热地区工程最关心的高温性能做进一步优化设计,并在广西某高速公路进行试验路铺筑。试验结果表明:在沥青性能上,相比国内外两种常用高黏改性沥青,HRVA复合改性高黏沥青具有更高的软化点、布氏黏度、车辙因子及弹性成分;在混合料性能上,HRVA-PAC13配合比设计结果符合规范要求,经过高温性能优化后的HRVA-PAC13混合料具有更显著的抗高温性能,其中采用碱性细集料效果最佳,通过混合料试验结果和试验路铺筑验证了HRVA-PAC13在炎热地区的工程性能适用性,同时在经济性上,HRVA复合改性高黏沥青相比常规高黏改性沥青每吨造价降低15%,具有良好的经济适用性。由试验结果可得,HRVA复合改性高黏沥青适用于炎热地区的工程应用。

关键词:沥青结合料;高黏改性沥青;高性能橡胶沥青;复合改性;工程适用性

透水沥青路面是一种新型开级配沥青路面,区别于常规应用的密级配沥青混合料路面,其空隙率为18%~25%,是常规路面空隙率的5~6倍。由于其大空隙率的特点,使得透水沥青路面不但具备传统沥青路面的使用性,而且兼具了透水降温、高速抗滑、多孔降噪等特点,近年来,在中国部分地区得到了大力推广应用。但它大空隙率的特点,使其相对于密级配沥青路面更容易受到雨水、紫外线、氧气等不利因素的侵蚀,故一般选用价格昂贵、性能优异的高黏改性沥青进行铺筑,由于造价昂贵,严重地制约了透水沥青路面在中国的发展。

橡胶是一种高弹性、高阻尼、抗老化特性的材料。采用废旧轮胎加工的橡胶粉对高黏沥青进行复合改性可以进一步提高高黏沥青的弹性、韧性、黏结性能及抗老化性能,这样既可以实现对废旧资源循环利用,又能大幅降低材料成本,为此研发了一种高性能橡胶复合改性高黏沥青。为了研究高性能橡胶复合改性高黏沥

青(HRVA)在炎热地区的工程适用性,该文优选国内外两种高黏改性沥青与高性能橡胶复合改性高黏沥青进行性能对比和优选,并且根据工程经验对高性能橡胶高黏改性沥青进行配合比设计,在此基础上,对炎热地区工程最关心的高温性能做进一步优化设计,以期得出最优的配比设计,并通过铺筑试验路验证高性能橡胶高黏改性沥青在炎热地区的工程适用性。

1 试验原材料与仪器介绍

1.1 试验原材料

试验采用70#A级道路石油沥青作为试验基质沥青,基质沥青的技术性能指标及试验结果见表1。由表1可知:所采用的基质沥青满足JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》的相关要求。

研究采用的两种高黏改性剂分别为日本TPS和中国产S型高黏改性剂,均为淡黄色颗粒状物质,掺量

收稿日期:2020-03-10(修改稿)

基金项目:广西科技厅重点研发项目(编号:桂科AB7292035);广西自然科学基金资助项目(编号:2018GXNSFAA294146);广西科技重点研发项目(编号:桂科AB19245019);广西技术引导专项(编号:桂科AC16380112)

作者简介:谢泽华,女,硕士,高级工程师, E-mail:405763667@qq.com

(外掺)均设定为高黏改性剂常用掺量 12%,而高性能橡胶复合改性高黏沥青(HRVA)中 G 型高黏改性剂掺量(外掺)为 7%左右。

表 1 基质沥青技术指标

技术指标	单位	试验结果	技术要求
针入度(25℃,5 s,100 g)	0.1 mm	65.7	60~80
针入度指数 PI		-1.40	-1.5~+1.0
软化点	℃	49.2	≥46
延度(15℃)	cm	>100	≥100
闪点	℃	263	≥260
溶解度	%	99.8	≥99.5
密度(15℃)	g/cm ³	1.020	实测
RTFOT 后			
质量损失	%	0.29	≤±0.8
残留针入度比(25℃)	%	76.4	≥61

1.2 高黏改性沥青的制备

将基质沥青在 135℃的烘箱中加热 1 h,然后加入一定比例的高黏改性剂搅拌均匀,放置于 150~160℃的烘箱中,发育 2 h 后取出,在 160~170℃的温度下高速剪切(4 000 r/min) 1 h,直至高黏改性剂全部溶解且分布均匀,制得高黏改性沥青。

2 高黏改性沥青性能试验结果分析

2.1 三大指标试验结果

按照文献[8]分别对掺量为 12%TPS 高黏改性沥青、12%S 型高黏改性沥青及高性能橡胶复合改性高黏沥青进行针入度、软化点及 5℃延度试验,结果如表 2 所示。

表 2 不同种类高黏改性沥青三大指标试验结果

项目	针入度/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	5℃延 度/cm
TPS	45.4	74.0	23.8
S 型	40.6	84.6	38.8
HRVA	40.0	94.0	22.2
基质沥青	65.4	49.2	1.2
要求	40~80	≤70	≤20

从表 2 可知:3 种高黏改性沥青的针入度相比基质沥青均有所下降、软化点均得到极大改善、5℃延度均得到提高。这说明高黏改性剂和高性能橡胶复合改性均可极大地提高基质沥青的性能,其中高性能橡胶复合改性高黏沥青的高温性能最好,S 型高黏改性沥

青的低温性能最好。

2.2 布氏黏度试验结果

黏度代表沥青的黏滞性。3 种高黏改性沥青的布氏黏度试验结果如图 1 所示。

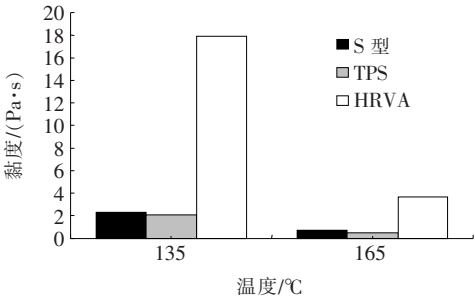


图 1 不同温度下高黏改性沥青布氏黏度

从图 1 可知:不同温度下,高黏改性沥青结合料的布氏黏度均随着温度升高而降低,其中 HRVA 高黏沥青的布氏黏度远远大于 TPS 和 S 型高黏改性沥青,这表明高温状态下,HRVA 呈现出更强的黏结力和抵抗流动变形能力,相比 TPS 和 S 型高黏改性沥青更适用于炎热地区的工程应用。

2.3 动态剪切流变性能试验结果

动态剪切流变仪检测得到的沥青复数剪切模量 G^* 和相位角 δ 结果见图 2、3。

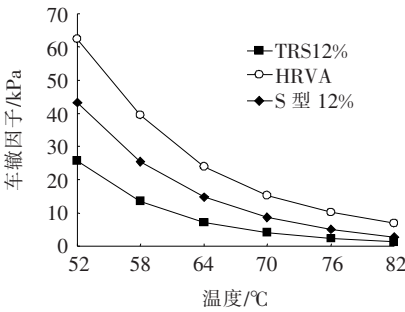


图 2 车辙因子随温度变化关系

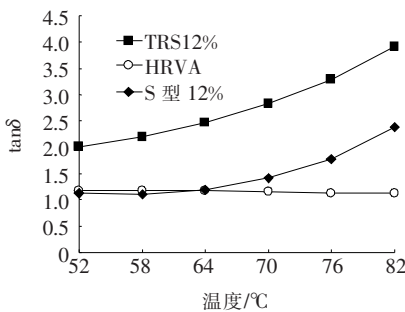


图 3 相位角正切值随温度变化关系

由图 2 可得:① 3 种高黏改性沥青的车辙因子均随着温度的升高而降低,其中 HRVA 复合改性高黏

沥青的车辙因子最大,TPS 高黏改性沥青的车辙因子最小。这表明随着温度的升高,高黏改性沥青抵抗高温的能力不断减弱,但是三者中 HRVA 复合改性高黏沥青的抗高温能力最强;② 即使温度达到 82 ℃,HRVA 复合改性高黏沥青的车辙因子仍然达到 10 kPa,远超美国 ASSHTO 规范中高温抵抗能力失效值 1 kPa。表明 HRVA 复合改性高黏沥青具备超高的抗高温能力。

由图 3 可得:TPS 和 S 型高黏改性沥青的相位角正切值均随着温度的升高而增大;HRVA 复合改性高黏沥青的相位角正切值随着温度的升高而降低。这表明随着温度升高,TPS 和 S 型高黏改性沥青的黏性成分不断增加,弹性成分不断降低;而 HRVA 复合改性高黏沥青的黏性成分不断降低,弹性成分不断增加,恢复能力不断增强,抵抗高温的性能不断提高。出现以上现象的原因是常规的高黏改性沥青因为温度的升高增加了沥青中的分子热运动,导致沥青中的黏性成分增加,从而占据主导地位;而胶粉在 HRVA 复合改性高黏沥青中起到“弹性存储”作用,随着温度的升高,可以不

断释放弹性成分,增强高温抵抗不可恢复变形能力。

3 配合比设计

广西作为湿热地区的代表,各地年平均气温为 16.8~23.3 ℃,夏季气温最高达 38 ℃以上,同时降水充沛,干湿分明,雨热同期,是中国降水量最丰富的省区之一。每年 4—9 月为雨季,总降水量占全年降水量的 70%~85%,容易发生城市内涝等灾害。因此,该文根据广西湿热同期的气候条件,设计大孔隙、抗高温及高耐久的排水沥青路面混合料。

3.1 矿料基本指标及级配设计

目标配合比设计所用粗集料为 1[#](10~15 mm)、2[#](5~10mm)辉绿岩碎石,细集料为 3[#](0~3 mm)辉绿岩机制砂,填料为石灰岩矿粉,沥青选用 HRVA 复合改性高黏沥青,制备 PAC-13 混合料(简称:HRVA-PAC13)。各档集料及填料的筛分级配、吸水率及密度试验均符合 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》要求。矿料级配设计如表 3 所示。

表 3 级配设计结果

材料组成 (1 [#] 料:2 [#] 料:3 [#] 料:矿粉)	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%									
	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
合成级配(50:33:14:3)	100	98.5	68.2	17.6	12.9	10.6	8.9	7.2	6.3	4.7
级配上限	100	100	71.0	30.0	20.0	17.0	14.0	12.0	9.0	7.0
级配下限	100	90.0	40.0	10.0	9.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0
级配范围中值	100	95.0	55.5	20.0	14.5	12.0	10.0	8.5	6.5	5.0

3.2 油石比确定

将 HRVA-PAC13 混合料油石比分为 5 组,进行配合比设计,按矿料级配和油石比成型马歇尔试件,

进行飞散试验和析漏试验,确定最高油石比 OAC_{max} 与最低油石比 OAC_{min} 。不同油石比下沥青混合料的体积指标、析漏试验及飞散试验结果如表 4 所示。

表 4 不同油石比下 HRVA-PAC13 混合料试验结果

油石比/ %	最大理论 相对密度	毛体积 相对密度	空隙率 VV/%	连通空隙 率/%	透水系数/ (cm·s ⁻¹)	稳定度 MS/kN	流值 FL/mm	析漏损 失/%	飞散损 失/%
4.0	2.684	2.114	21.2	15.2	0.28	4.9	4.2	0.02	11.5
4.5	2.664	2.117	20.6	14.7	0.23	4.6	4.3	0.06	6.9
5.0	2.645	2.139	19.1	13.8	0.23	5.0	4.4	0.04	4.8
5.5	2.626	2.166	17.5	12.5	0.21	5.8	5.4	0.11	10.9
6.0	2.608	2.154	17.4	12.1	0.19	5.3	3.7	0.12	15.7
技术要求			18~25			≥3.5		<0.3	<20

由表 4 可得:随着油石比的增加,HRVA-PAC13 沥青混合料的空隙率、连通空隙率及透水系数

不断减小;稳定度、流值及析漏损失则呈现先增大后减小趋势;飞散损失则呈现先减小后增大的趋势。这表

明随着 HRVA 复合改性高黏沥青含量的增大,HRVA—PAC13 沥青混合料的空隙率和透水能力不断下降,而抵抗变形能力、抵抗飞散能力及沥青析漏能力存在最佳油石比。综合以上性能及考虑经济效益,选定最佳油石比为 5.0%。

3.3 性能验证

3.3.1 水稳定性检验

沥青混合料的水稳定性是沥青路面耐久性的关键性指标,采用浸水稳定度和冻融劈裂试验评价。试验结果见表 5。

表 5 HRVA—PAC13 混合料水稳定性试验结果

项目	油石比/ %	残留稳定度/ %	冻融劈裂残留 强度比/%
HRVA—PAC13	5.0	96.0	87.8
技术要求		≥85	≥80

由表 5 可得:在油石比 5.0%下,HRVA—PAC13 混合料的残留稳定度和冻融劈裂残留强度比均远大于技术要求,表明 HRVA—PAC13 具有良好的抗水损害能力。这主要是因为 HRVA 复合改性高黏沥青中胶粉的加入,一方面提高了沥青混合料抵抗紫外线等抗老化能力;另一方面由于胶粉吸油的特性,在析漏不增加的情况下,大大地增加了油膜厚度,提高了混合料抵抗水损害的能力和黏结强度。

3.3.2 高温稳定性检验

动稳定度是表征沥青混合料抵抗高温能力的重要指标之一,根据文献[8]的要求,采用车辙试验评价 HRVA—PAC13 的高温稳定性。试验结果见表 6。

表 6 车辙试验结果

项目	油石比/ %	动稳定度/ (次·min ⁻¹)	总变形/ mm
HRVA—PAC13	5.0	6934	1.467
技术要求		≥3 500	

由表 6 可得:HRVA—PAC13 混合料的动稳定度为要求值的两倍左右,总变形量也较小,符合规范要求,这表明 HRVA—PAC13 混合料具有优良的抗高温强度和变形能力。

3.4 高温性能优化

为了进一步提高 HRVA—PAC13 混合料的高温性能,优化配合比设计,增强炎热地区用户使用信心,保证炎热地区的高温使用性能。该节在上述配合比设计和不降低其他性能的基础上,专门针对 HRVA—

PAC13 高温性能做进一步优化,主要采用以下几种方案,即细集料辉绿岩替换成石灰岩、微调油石比、增加填料用量及更换填料种类。不同优化方案及试验结果如表 7 所示。

表 7 不同优化方案及试验结果

优化 方案	细集 料	矿粉 掺量/ %	水泥 掺量/ %	油石 比/%	动稳定 度/(次· mm ⁻¹)	总变 形量/ mm
1	辉绿岩	3	0	5.0	6 934	1.939
2	辉绿岩	4	0	5.0	6 873	1.946
3	石灰岩	4	0	5.0	12 791	1.568
4	石灰岩	4	0	5.2	13 819	1.467
5	石灰岩	2	2	5.2	10 391	1.443

对比表 7 中方案 1、2 可得:当细集料为辉绿岩时,增加矿粉用量,对 HRVA—PAC13 混合料的高温性能影响较小;对比方案 2、3 可得:将细集料更换为石灰岩后,HRVA—PAC13 混合料的动稳定度较原来增加了约 1 倍,这主要是因为石灰岩为碱性石料,可以很好地与沥青吸附,形成黏结能力更强的胶浆,从而大大地提高了 HRVA—PAC13 混合料抵抗车辙的能力。对比方案 3、4 可得:适当地增加油石比,也可以提高动稳定度,但效果远不如更换碱性细集料好。对比方案 4、5 可得:若将填料中一部分的矿粉用水泥代替,则会降低 HRVA—PAC13 混合料的动稳定度,出现以上现象的主要原因为 HRVA 复合改性高黏沥青中的胶粉已经将沥青中富裕的轻质组分充分吸收,当再加入高碱性并且具有膨胀作用的水泥后,HRVA—PAC13 混合料则会出现吸油不足而发生微裂缝,从而导致 HRVA—PAC13 混合料动稳定度下降。

综合上述,HRVA—PAC13 混合料的最佳油石比为 5.2%,细集料采用石灰岩,粗集料采用辉绿岩,材料组成比例为:1[#]料:2[#]料:3[#]料:矿粉=50:32:14:4。

4 实际工程验证

为了验证 HRVA—PAC13 混合料的实际工程效果,在广西某高速公路进行 400 m 的试验路铺筑,施工前一天对中面层进行封水处理,洒布两遍 SBS 改性乳化沥青作为封层,经过渗水检测合格后再进行 HRVA—PAC13 的施工(渗水系数≤300 mL/min)。施

工机械采用大功率 DT-1900 摊铺机,摊铺温度为 180℃;两台钢轮压路机并行碾压,初压次数为 1~2 遍,复压 3~4 遍,碾压温度为 150~170℃,最后当路面温度降至 90~110℃时,再上 1 台胶轮压路机,碾压 1 遍。当路面温度降至常温之后,即可对 HRVA-PAC13 路面进行检测,试验路检测结果如表 8 所示。

表 8 试验路检测结果

项目	空隙率/%	连通空隙率/%	压实度/%	渗水系 数/(mL·min ⁻¹)	摩擦 摆值/BPN (0.01 mm)	动态弯 沉/
HRVA-PAC13	19.5	13.2	101	6 126	70	6.0
技术指标	18~25		>98	>5 000	>58	≤13.3

由表 8 可得:试验路各项检测指标都满足技术要求,并且均有富余;从现场铺筑效果来看,试验路表面平整、渗水良好、无坑槽、泛油等不良病害。表明 HRVA-PAC13 混合料具有良好的实际工程效果和可期的应用前景。

5 工程适用性分析

经济效益分析:HRVA 复合改性高黏沥青由于胶粉的掺入,一方面具有加筋作用,在混合料中不需要再额外添加纤维;另一方面胶粉价格低廉,在不降低性能的基础上,胶粉可以替代正常高黏改性剂掺量的 5% 左右,相比常规高黏改性沥青每吨造价降低 15%。材料单价及材料价格计算过程见表 9。

表 9 材料价格计算结果

改性沥青种类	外掺/%	内掺/%	计算过程及结果/(元·t ⁻¹)	降低百分率/%
常规高黏改性沥青	12	10.7	$1 \times 10.71\% \times 40\ 000 + 1 \times 89.29\% \times 3\ 500 = 7\ 409.2$	15
HRVA	7	6.54	$1 \times 6.54\% \times 40\ 000 + 1 \times 93.46\% \times 4\ 100 = 6\ 447.9$	

注:高黏改性剂、基质沥青、高性能橡胶沥青的材料价格分别为 40 000、3 500、4 100 元/t。

力学性能分析:在沥青性能上,通过对比国内外两种高黏改性沥青的性能可得,HRVA 复合改性高黏沥青的黏结性能和抗高温性能显著,其他方面的性能与

常规高黏改性沥青相当。在混合料性能上,HRVA-PAC13 混合料在满足规范要求的前提下,具备优良的抗车辙性能。

综上所述可得,HRVA-PAC13 混合料经过体积指标和路用性能验证,满足规范要求,工程性能优良,同时具有较好的经济性,适用于炎热地区的工程应用。

6 结论

(1) 相比国内外两种常用高黏改性沥青,HRVA 复合改性高黏沥青具有更高的软化点、布氏黏度、车辙因子及弹性成分,表明 HRVA 复合改性高黏沥青具有更高的抗高温性能、高温黏结性能及高弹性成分。

(2) 按照 JTG F40-2004《公路沥青路面施工技术规范》要求,对 HRVA 复合改性高黏沥青进行配合比设计和高温性能优化,设计结果符合规范要求,经过高温性能优化后的 HRVA-PAC13 混合料具有显著的抗高温性能,其中采用碱性细集料效果最佳,满足炎热地区的工程性能。

(3) 通过对 HRVA 复合改性高黏沥青及混合料进行性能试验、配合比设计及试验路的铺筑,验证了 HRVA-PAC13 在炎热地区的工程适用性,同时相比常规高黏改性沥青造价降低 15%,具有良好的经济效益。

参考文献:

[1] Özay O,Öztürk A. Performance of Modified Porous Asphalt Mixtures[J]. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 2013, 28(3).

[2] 于保阳,高超,张荣华. 基于东北季冻区气候下高黏改性沥青性能研究[J]. 中外公路,2019(1).

[3] 刘向东. 活化橡胶改性沥青混合料路用性能研究[J]. 中外公路,2019(2).

[4] JTG F40-2004 公路沥青路面施工技术规范[S].

[5] 丛卓红,吴喜荣,郑南翔,等. 高黏度改性剂对沥青性能的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2011(4).

[6] 唐丽荣,吕大春,胡松山,等. 湿热气候下高黏改性剂对沥青使用性能的影响研究[J]. 西部交通科技,2019(6).

[7] 崔世富. 掺木质纤维的多孔沥青混合料性能研究[J]. 中外公路,2019(2).

[8] JTG E20-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].

[9] 弥海晨,张娟,郭平,等. 老化后橡胶沥青混合料高温性能研究[J]. 中外公路,2019(4).