

文章编号:1672-9331(2018)04-0001-08

委内瑞拉岩沥青改性沥青混合料配合比 设计及性能研究

查旭东^{1,2}, 马健翔², 邓杰元²

(1. 长沙理工大学 公路养护技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410114;
2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 委内瑞拉岩沥青(Venezuela Rock Asphalt,简称 VRA)中沥青含量高达 95%以上,是一种沥青含量高、灰分杂质少且易于加工的硬质天然沥青。为了分析其用于沥青改性剂的适用性,选取表面层常用 AC-13C 型沥青混合料,在 0%~1%范围内按 0.25%间隔选取 5 种不同 VRA 掺量,对其改性沥青混合料进行了配合比设计和路用性能检验。首先,以普通沥青混合料配合比设计结果为基准,根据 VRA 中纯沥青和矿物质分别等量替代普通沥青混合料中基质沥青和矿粉的原则,提出了 VRA 改性沥青混合料配合比设计调整的计算公式;同时,通过干法和湿法两种拌和工艺对比,确定了适宜于 VRA 改性沥青混合料拌制的温度范围与干法工艺。然后,分别进行了不同 VRA 掺量改性沥青混合料的路用性能试验,结果显示,随着 VRA 掺量的增加,VRA 改性沥青混合料的马歇尔稳定度、动稳定度、抗弯拉强度和劲度模量呈加速递增变化,残留稳定性和冻融劈裂强度比呈先增加后减小变化,而流值呈递减变化,最大弯拉应变呈平缓的加速递减变化,表面渗水系数和构造深度变化不大。研究结果表明,VRA 的掺入可有效增强其改性沥青混合料的整体黏结性能和抗变形能力,并显著提高高温稳定性和抗疲劳性能,有效改善水稳定性,但对低温抗裂性能有一定的不利影响,而对表面抗渗和抗滑性能无明显影响。故 VRA 较适合于南方地区沥青路面使用,根据试验结果建议 VRA 的适宜掺量范围为其改性沥青混合料质量的 0.25%~0.75%。

关键词: 委内瑞拉岩沥青;天然沥青;改性沥青混合料;配合比设计;路用性能

中图分类号:U414

文献标识码:A

Research on mix design and pavement performance for modified asphalt mixture of Venezuela Rock Asphalt (VRA)

ZHA Xu-dong^{1,2}, MA Jian-xiang², DENG Jie-yuan²

(1. National Engineering Laboratory for Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The asphalt content is up to 95% or more in Venezuela Rock Asphalt (VRA), which is a kind of hard natural asphalt with high in asphalt content, less in ash and impurities and easy to process. In order to analyze the applicability of VRA for being used to asphalt modifier, and through selecting the AC-13C type of asphalt mixture commonly used in the surface layer and five different mixing amounts of VRA mass ratio of VRA to its modi-

收稿日期:2018-10-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878077)

通讯作者:查旭东(1970—),男,安徽岳西人,长沙理工大学教授,博士生导师,主要从事道路工程方面的研究。

E-mail:1756023135@qq.com

fied asphalt mixture from 0% to 1% in accordance with the 0.25% intervals, the mix design and pavement performance verification for VRA modified asphalt mixture are carried out. Firstly, based on the results of mix design of common asphalt mixture, and according to the principle that the pure asphalt and mineral in VRA replace the equivalent base asphalt and mineral powder in the common asphalt mixture respectively, the adjustment formulas of mix design are proposed for the VRA modified asphalt mixture. Meanwhile, through the comparisons of two mixing processes between dry method and wet method, the temperature ranges and dry process which are suitable for mixing VRA modified asphalt mixture are determined. Lastly, the pavement performances of modified asphalt mixture under different VRA mixing amounts are tested respectively. The results show that, along with the increase of VRA mixing amount, all the Marshall stability, dynamic stability, flexural tensile strength and stiffness modulus of VRA modified asphalt mixture have accelerative increasing changes, both the residual stability and freeze-thaw splitting tensile strength ratio increase first and then decrease, the flow value has decreasing change, the maximum flexural tensile strain has gently accelerate decreasing change, and both the surface water permeability coefficient and texture depth have little changes. Therefore, it shows that the mixing VRA can effectively enhance the whole bond behavior and deformation resistance for the VRA modified asphalt mixture, significantly increase the high temperature stability and fatigue resistance and effectively improve the water stability, but it has some adverse effects on the low temperature crack resistance and no obvious effects on the surface impermeability and skid resistance. The VRA is more suitable for the use of asphalt pavement in the southern areas. According to the test results, it is suggested that the suitable range of mixing amount of VRA is 0.25%~0.75% of the mass of its modified asphalt mixture.

Key words: Venezuela Rock Asphalt (VRA); natural asphalt; modified asphalt mixture; mix design; pavement performance

国内外大量研究与应用表明,岩沥青作为一种天然沥青,其性质与普通石油沥青相似,并具有沥青质含量高、矿物质吸附能力强、化学性质特别稳定及不含蜡等特点。将其作为沥青改性剂时,其与基质沥青具有优良的配伍性,并能有效增强沥青路面的抗车辙、抗水损、抗老化及抗疲劳等性能,且适宜岩沥青掺量的岩沥青改性沥青路面的使用性能和使用寿命可达到或甚至超过 SBS 改性沥青路面的同等应用效果^[1-4]。同时,其改性工艺简单,性价比较高^[5,6]。因此,岩沥青在沥青路面工程中得到越来越广泛的应用。

岩沥青的种类较多,分布较广,目前在沥青路面工程中得到应用的主要有北美 5U 岩沥青^[7]和印尼布敦岩沥青(Buton Rock Asphalt,简称 BRA)^[8,9]及我国的四川青川岩沥青^[10]和新疆乌尔禾岩沥青^[11]等。由于成矿地质条件不同,各种岩沥青的组成成分差异较大,包括纯天然沥青的

含量、组分和性质以及矿物质含量、成分和性质等都各不相同,如: BRA 中纯天然沥青含量在 25%左右,而青川岩沥青中纯天然沥青含量可高达 80%左右^[12,13]。因此,应用岩沥青时必须根据其特有的组成成分和性质,通过试验确定其在沥青混合料中的适宜掺量和掺配工艺,从而保证其改性效果^[14-16]。

委内瑞拉岩沥青(Venezuela Rock Asphalt,简称 VRA)产于南美洲委内瑞拉奥利诺河流域,初步估计储量高达 1.2×10^{12} 桶^[17],它具有杂质少、沥青含量高、储量丰富且易于加工等特点,是一种目前国内外道路工程界尚未引起足够关注的岩沥青。为此,作者选取 VRA 作为研究对象,通过对不同 VRA 掺量改性的 AC-13C 沥青混合料进行配合比设计和路用性能检验,以确定 VRA 的适宜掺量和掺配工艺,从而为其在沥青路面工程中的应用提供参考。

1 原材料性能检验

1.1 VRA 和基质沥青

试验所用 VRA 原材料和基质沥青的主要性能检验结果如表 1~3 所示,其中,表 2 为 VRA 经燃烧法燃烧后的残留矿物质的筛分结果。表 1 和表 2 显示,VRA 呈黑色粉末状,密度略大于石油沥青,且其矿物质颗粒粒径较细,与矿粉接近;其溶解度高达 95% 以上,说明其沥青含量高,灰分杂质少,且易于加工,是一种硬质天然沥青;溶剂法溶解度与燃烧法测试的沥青含量结果基本一致,二者相差仅为 0.09%,由于燃烧法简单易行,后续 VRA 的沥青含量以燃烧法测试结果为准。表 3 显示了基质沥青满足 A-70# 道路石油沥青的技术要求。

表 1 VRA 原材料主要性能检验结果

Table 1 Test results of main performance for VRA raw material

性能指标	试验结果
外观	黑色粉末
密度/(g·cm ⁻³)	1.193
含水量/%	0.62
溶解度 /%	96.84
燃烧后	沥青含量/%
	96.93
燃烧后	矿物质含量/%
	3.07

表 2 燃烧后 VRA 残留矿物质筛分结果

Table 2 Screening results of VRA residual mineral after combustion %

	筛孔尺寸/mm					
	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率	100.0	94.2	88.1	82.3	73.8	59.6

表 3 A-70# 基质沥青主要性能检验结果

Table 3 Test results of main performance for A-70# base asphalt

性能指标	试验结果	技术要求
25℃针入度/(0.1 mm)	66	60~80
针入度指数	-0.369	-1.5~1.0
软化点/℃	48.0	≥46
15℃延度/cm	148.0	≥100
25℃密度/(g·cm ⁻³)	1.034	—
60℃动力粘度/(Pa·s)	187	≥180
质量变化/%	-0.019	≤±0.8
RTFOT 后 25℃针入度比/%	78.1	≥61
15℃残留延度/cm	45.8	≥15

1.2 集料和矿粉

试验所用粗集料、细集料和矿粉均为石灰岩加工的矿料,主要性能检验结果如表 4、5 所示。由表 4、5 可以看出,各档矿料均满足技术要求。

表 4 集料主要性能检验结果

Table 4 Test results of main performance for aggregate

集料种类	压碎值/ %	洛杉矶磨 耗损失/%	表观相对 密度	毛体积相 对密度	吸水率/ %	针片状颗粒 含量/%	含泥量/ %
1# 粗集料(10~15 mm)	22.5	18.4	2.770	2.718	0.69	10.9	—
2# 粗集料(5~10 mm)	—	18.4	2.738	2.695	0.58	7.5	—
3# 粗集料(3~5 mm)	—	—	2.727	2.693	0.46	—	—
4# 细集料(0~3 mm)	—	—	2.762	2.699	0.83	—	2.0
技术要求	≤26	≤28	粗集料≥2.60 细集料≥2.50	—	≤2	粒径大于 9.5 mm ≤12 粒径小于 9.5 mm ≤18	≤3

表 5 矿粉主要性能检验结果

Table 5 Test results of main performance for mineral powder

性能指标	试验结果	技术要求
外观	无团粒结块	无团粒结块
表观密度/(g·cm ⁻³)	2.745	≥2.50
含水率/%	0.45	≤1
亲水系数	0.54	≤3
加热安定性	无明显颜色变化	实测记录

2 VRA 改性 AC-13C 配合比设计

通常岩沥青是作为沥青改性剂掺入到普通沥青混合料中使用,故选取表面层常用 AC-13C 型沥青混合料来进行 VRA 改性沥青混合料 AC-13C(简记为 VAC-13C)的配合比设计。

2.1 普通 AC-13C 配合比设计

根据矿料筛分结果及工程实践经验,确定普通 AC-13C 的矿料配合比为 1# 粗集料:2# 粗集料:3# 粗集料:4# 细集料:矿粉=19:37:2:

41:1,相应的合成级配如表 6 所示。据此,设定初试油石比范围为 4%~6%,并按 0.5% 间隔选取 5 种油石比,采用马歇尔法进行普通 AC-13C 的配合比设计试验,由此可以确定最佳油石比为 4.9%。

表 6 普通 AC-13C 矿料合成级配设计结果

Table 6 Design results of composite gradation for mineral material of common AC-13C %

矿料种类	通过下列筛孔(mm)的质量百分率									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
1# 粗集料	100	69.4	7.6	0.7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4
2# 粗集料	100	100.0	94.1	5.1	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7
3# 粗集料	100	100.0	100.0	70.8	2.2	1.7	1.6	1.5	1.5	1.3
4# 细集料	100	100.0	100.0	99.7	71.8	51.8	33.2	22.0	16.9	9.8
矿粉	100	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	96.2	90.7	76.6
合成级配	100	94.2	80.3	45.3	30.9	22.7	15.1	10.4	8.2	5.1
级配范围	100	90~100	68~85	38~68	24~40	15~38	10~28	7~20	5~15	4~8

2.2 VRA 改性沥青混合料配合比修正

以普通沥青混合料配合比设计结果为基准,根据 VRA 中纯沥青和矿物质分别等量替代普通沥青混合料中基质沥青和矿粉的原则,进行 VAC-13C 配合比设计,按照普通 AC-13C 配合比设计结果及表 1 中燃烧法测试的 VRA 沥青含量和矿物质含量结果,可以按式(1)和式(2)分别计算不同 VRA 掺量下 VAC-13C 配合比,设计调整后的基质沥青实际最佳油石比与矿料中实际矿粉百分比。

$$P'_a = P_a - v \frac{a}{100} \left(1 + \frac{P_a}{100} \right) \quad (1)$$

$$P'_m = P_m - v \left(1 - \frac{a}{100} \right) \left(1 + \frac{P_a}{100} \right) \quad (2)$$

式中: v 为 VRA 掺量,即按内掺法计算的 VRA 与其改性沥青混合料质量之比,%; a 为 VRA 中沥青含量,%; P_a 和 P_m 分别为普通沥青混合料的最佳油石比(%)与矿粉百分比(%); P'_a 和 P'_m 分别为掺入 VRA 后 VRA 改性沥青混合料中实际的基质沥青最佳油石比(%)和矿粉百分比(%)。

由于 VRA 呈黑色粉末状且沥青含量高,参考试拌结果及实践经验,按内掺法选取 0.25%,0.50%,0.75% 和 1.00% 四种 VRA 掺量进行 VAC-13C 配合比设计,由此根据普通沥青混合料配合比设计结果,可计算得到 VAC-13C 配合比中基质沥青和矿粉替代后的实际用量(如表 7

所示)。

虽然表 2 显示 VRA 矿物质中小于 0.075 mm 的颗粒含量接近 60%,但由于其含量很低,即使 VRA 掺量为 1%,矿物质也仅占混合料质量的 0.03%,且其级配与矿粉级配接近,故对混合料级配的影响很小,可忽略不计。为此,在 VAC-13C 配合比设计时,可不必对其矿料的合成级配进行修正。

表 7 不同 VRA 掺量下 VAC-13C 基质沥青和矿粉的实际用量

Table 7 Actual contents of base asphalt and mineral powder in VAC-13C under different VRA mixing amounts %

VRA 掺量 v	基质沥青油石比 P'_a	矿粉百分比 P'_m
0.00	4.90	1.00
0.25	4.65	0.99
0.50	4.39	0.98
0.75	4.14	0.98
1.00	3.88	0.97

2.3 VRA 改性沥青混合料拌和工艺

参考其他各种岩沥青及其改性沥青混合料的拌和温度要求,通过试拌确定 VAC 拌和过程中各阶段温度控制范围(如表 8 所示)。

为了确定 VAC 适宜的拌和工艺,分别采用干法和湿法拌和 VAC-13C,具体工艺如下。

表 8 VAC 拌和温度控制范围

Table 8 Control ranges for mixing temperature of VAC

拌和工序	温度范围/℃
矿料加热	180~190
A-70# 基质沥青加热	155~165
改性沥青混合料拌和	170~180
拌和好的改性沥青混合料	165~175

1) 干法拌和工艺。

按照设计配合比将预热好的各档集料倒入拌锅中拌和 30 s, 而后加入 VRA 一起拌和 60 s; 再加入提前置于烘箱中预热好的基质沥青一起拌和约 60 s, 最后加入预热好的矿粉再一起拌和 60 s, 由此拌制出均匀的 VAC 备用。整个拌和时间约为 3.5 min。

2) 湿法拌和工艺。

首先按设计配比, 再将基质沥青升温至 150 ℃, 掺入 VRA, 边搅拌边升温至 170~180 ℃; 而后采用高速剪切机以 3 000 r/min 的转速持续搅拌 VRA 与基质沥青混合物 30~60 min, 由此制成 VRA 改性沥青, 并置于 170 ℃ 烘箱中预热备用; 最后按常规改性沥青混合料拌和要求及设计配合比制备出均匀的 VAC 备用。

据此, 对 0.25% 和 0.75% 两种 VRA 掺量的 VAC-13C 分别按上述两种工艺拌和并击实成型马歇尔试件, 再进行马歇尔试验, 得到主要性能结果如表 9 所示。

从表 9 可以看出, 在相同的 VRA 掺量下, 与

湿法相比, 干法拌制的 VAC-13C 的毛体积相对密度略大, 而稳定度略小, 流值则基本一致。这主要是因为湿法能使 VRA 更充分地融于基质沥青, 从而增强了 VRA 改性沥青混合料的胶结性能, 但同时也增加了混合料击实成型的困难, 导致其毛体积相对密度略有减小, 而稳定度有所增加, 流值则影响不大。总体上, 在试验所用的 VRA 掺量下, 两种不同拌和工艺之间的马歇尔试验结果相差不大, 不会对 VAC-13C 的路用性能造成明显的影响。因此, 考虑到实际工程中干法拌和工艺更利于施工且经济性更高, 故建议采用干法进行 VRA 改性沥青混合料的拌制。

表 9 不同拌和工艺下 VAC-13C 马歇尔试验结果

Table 9 Marshall test results of VAC-13C under different mixing processes

VRA 掺量 $v/\%$	拌和工艺	毛体积相对 密度 γ_t	稳定度 MS/kN	流值 FL/mm
0.25	干法	2.429	16.88	2.9
	湿法	2.423	17.18	2.9
0.75	干法	2.414	21.87	2.7
	湿法	2.410	22.23	2.6

2.4 VRA 改性 AC-13C 马歇尔性能验证

在保持整体最佳油石比 4.9% 不变的情况下, 根据表 7 基质沥青和矿粉的调整用量及干法工艺对不同 VRA 掺量的 VAC-13C 进行了马歇尔试验, 试验结果如表 10 所示。

表 10 不同 VRA 掺量 VAC-13C 马歇尔试验结果

Table 10 Marshall test results of VAC-13C under different VRA mixing amounts

技术指标	VRA 掺量 $v/\%$					技术要求
	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	
最大理论相对密度 γ_t	2.538	2.533	2.529	2.525	2.521	—
毛体积相对密度 γ_t	2.435	2.429	2.421	2.414	2.404	—
空隙率 $VV/\%$	4.0	4.1	4.3	4.4	4.6	3~6
矿料间隙率 $VMA/\%$	14.1	14.3	14.5	14.8	15.1	≥ 13.5
沥青饱和度 $VFA/\%$	71.6	71.2	70.6	70.3	69.4	65~75
稳定度 MS/kN	15.50	16.88	18.79	21.87	25.93	≥ 8
流值 FL/mm	3.1	2.9	2.8	2.7	2.7	1.5~4.0

从表 10 可以看出, 随着 VRA 掺量的增加, VAC-13C 的最大理论相对密度、毛体积相对密度、沥青饱和度和流值逐渐减小, 且流值在 VRA

掺量超过 0.75% 以后趋于稳定; 而空隙率和矿料间隙率逐渐增大; 稳定度则逐渐增长, 且其增幅随 VRA 掺量的增加而增加。究其原因, 主要是因为

VRA 属于天然硬质沥青,粘度和硬度高,其掺入沥青混合料后增强了沥青与集料之间的粘结作用,从而提高了 VAC-13C 的整体粘结性能和抗变形能力,所以马歇尔稳定度明显增大,而流值减小。另一方面,粘结性能的提高使得在相同击实功下,VRA 掺量越高,VAC-13C 压实越困难,造成空隙率有所增加,但是各 VRA 掺量 VAC-13C 的马歇尔性能试验结果仍都能满足技术要求,表明在选取的 VRA 掺量范围内,不会因压实难度的增加而造成空隙率超出技术要求。同时也表明,采用等量替换原则进行 VRA 改性沥青混合料配合比设计是合适的。

3 VRA 改性 AC-13C 路用性能检验

为了进一步验证 VRA 改性沥青混合料的路用性能,对各 VRA 掺量 VAC-13C 的高温稳定性、水稳定性、低温抗裂性能、抗滑性能及抗渗性能等分别进行了检验,并与常用 SBS 改性 AC-13C 的路用性能进行了对比分析,其中 SBS 改性沥青中 SBS 掺量为 4.2% 左右。同时,SBS 改性 AC-13C 的最佳油石比及合成级配与普通 AC-13C 的相同,由此得到相应的试验结果如表 11 及图 1~6 所示。

表 11 不同 VRA 掺量 VAC-13C 路用性能检验结果

Table 11 Test results of pavement performance for VAC-13C under different VRA mixing amounts

混合料类型	VRA 掺量 $v/\%$	高温稳定性	水稳定性		低温抗裂性能			抗渗性能	抗滑性能
		动稳定度 $DS/(\text{次} \cdot \text{mm}^{-1})$	残留稳定度 $MS_0/\%$	冻融劈裂强度比 $TSR/\%$	抗弯拉强度 R_B/MPa	最大弯拉应变 $\epsilon_B/\mu\epsilon$	劲度模量 S_B/MPa	渗水系数 $C_w/(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$	表面构造深度 TD/mm
VAC-13C	0.00	1 441	87.8	80.2	7.42	2 473	3 003	59.6	0.60
	0.25	2 502	92.4	85.5	7.84	2 414	3 252	58.7	0.64
	0.50	4 802	96.7	88.8	8.58	2 337	3 679	62.3	0.74
	0.75	7 728	98.9	90.9	9.49	2 198	4 318	60.7	0.59
	1.00	11 897	94.1	86.0	10.67	2 012	5 303	64.1	0.71
SBS 改性 AC-13C	—	5 079	93.4	89.3	9.81	2 650	3 702	61.5	0.63

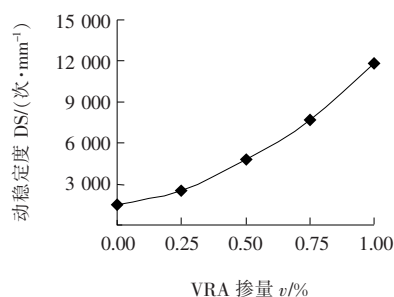


图 1 DS- v 变化曲线

Fig. 1 DS- v change curve

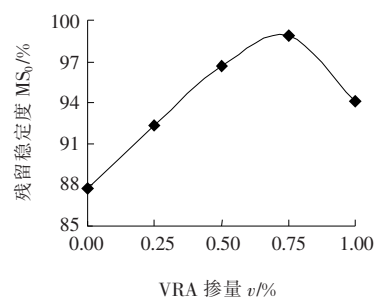


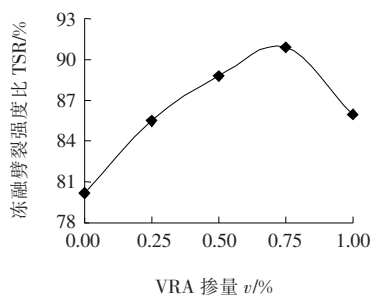
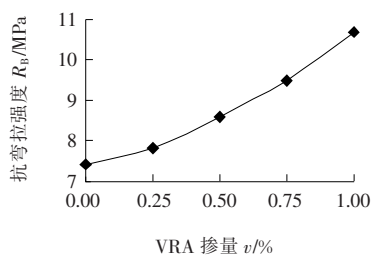
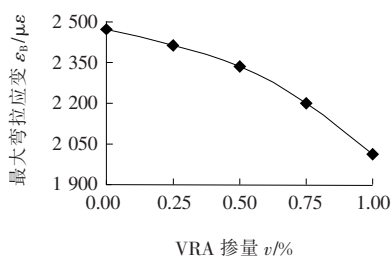
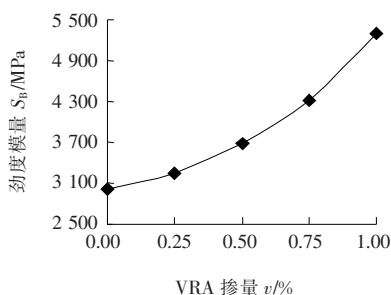
图 2 MS_0 - v 变化曲线

Fig. 2 MS_0 - v change curve

从表 11 及图 1~6 可以看出:

1) 随着 VRA 掺量的增加,VAC-13C 的动稳定度增幅随之增大,呈现加速增长的趋势。当 VRA 掺量为 0.50% 时,VAC-13C 的动稳定度接近 SBS 改性 AC-13C 的结果;而当 VRA 掺量达到 0.75% 及 1.00% 时,VAC-13C 的动稳定度分

别是 SBS 改性 AC-13C 的 1.52 倍和 2.34 倍,说明 VRA 掺量越大,VRA 的增黏增韧作用对其改性沥青混合料高温稳定性的改善效果越显著。同时,VRA 掺量为 0.25% 时,VAC-13C 的动稳定度满足夏季炎热地区不小于 2 400 次/mm 的技术要求,因此建议 VRA 掺量不宜低于 0.25%。

图 3 TSR- v 变化曲线Fig. 3 TSR- v change curve图 4 R_B - v 变化曲线Fig. 4 R_B - v change curve图 5 ϵ_B - v 变化曲线Fig. 5 ϵ_B - v change curve图 6 S_B - v 变化曲线Fig. 6 S_B - v change curve

2) 各掺量 VAC-13C 及 SBS 改性 AC-13C 的残留稳定性和冻融劈裂强度比均分别满足改性沥青混合料不小于 85% 和 80% 的技术要求。随着 VRA 掺量的增加,残留稳定性和冻融劈裂强度比呈现先增后减的变化趋势,当 VRA 掺量为 0.75% 时,二者均达到峰值,且分别比 SBS 改性

AC-13C 的提高了 5.5% 和 1.6%,表明 VRA 增强了其改性沥青混合料的粘附性能,可有效提高水稳定性。然而,当 VRA 掺量超过 0.75% 以后,VRA 改性沥青混合料变硬,增加了压实困难,导致空隙率增加,从而使残留稳定性和冻融劈裂强度比呈现明显的下降趋势,降低了水稳定性,因此建议 VRA 掺量不宜超过 0.75%。

3) 随着 VRA 掺量的增加,VAC-13C 的低温抗弯拉强度及劲度模量呈加速增长的变化趋势,而最大弯拉应变呈平缓加速减小的变化趋势,且其最大弯拉应变均小于 SBS 改性 AC-13C 的结果;当 VRA 掺量为 0.50% 时,VAC-13C 的最大弯拉应变是 SBS 改性 AC-13C 的 88.2%。这表明 VRA 的掺入使其改性沥青混合料变硬变脆,降低了低温抗裂性能,总体比 SBS 改性沥青混合料的低温性能差,但是其弯拉强度增加显著,有效地提高了抗疲劳性能。同时,各掺量 VAC-13C 的最大弯拉应变均不小于 2000 $\mu\epsilon$,因此 VRA 较适合于对低温性能要求相对较低的南方地区应用。

4) 各 VRA 掺量 VAC-13C 及 SBS 改性 AC-13C 的渗水系数与表面构造深度均分别满足 ≤ 120 mL/min 和 ≥ 0.55 mm 的技术要求,且变化幅度不大,也未呈现规律性变化。这表明随着 VRA 掺量的增加,虽然增大了压实困难而使空隙率有所增加,但对抗渗性能无明显影响,也不会影响混合料表面集料颗粒形态,可保持规定的抗滑性能。

4 结论

1) VRA 原材料呈黑色粉末状,密度略高于石油沥青,沥青含量高达 95% 以上,而矿物质含量不足 5%,且级配与矿粉接近,表明其沥青含量高、灰分杂质少,是一种易于加工的硬质天然沥青。同时,溶剂法和燃烧法测得的 VRA 中沥青含量基本一致。为方便试验,建议采用燃烧法进行沥青含量的测试。

2) 根据混合料试拌和岩沥青应用经验,确定了 VRA 改性沥青混合料的拌制温度。同时,通过干法和湿法两种拌和工艺拌制 VRA 改性沥青混合料,进行了马歇尔试验对比,结果显示两种拌和工艺的马歇尔性能试验结果相差不大。考虑经济

性及施工方便,建议采用干法拌制 VRA 改性沥青混合料。

3) 以普通沥青混合料配合比设计结果为基础,根据 VRA 中纯沥青和矿物质分别等量替代普通沥青混合料中基质沥青和矿粉的原则,提出了 VRA 改性沥青混合料配合比设计调整后的实际基质沥青最佳油石比和矿料中实际矿粉百分比的计算公式。

4) 不同 VRA 掺量改性沥青混合料的马歇尔试验结果显示,各项马歇尔性能均满足技术要求,说明采用等量替代原则进行配合比设计是合适的。同时,VRA 的掺入使得马歇尔稳定度加速增长,流值逐渐减小,表明其可有效提高改性沥青混合料的整体粘结性能和抗变形能力,但增大了压实困难,造成空隙率有所增加。

5) 不同 VRA 掺量改性沥青混合料的路用性能检验结果显示,随着 VRA 掺量的增加,VRA 改性沥青混合料的动稳定度、抗弯拉强度和劲度模量呈加速增长的变化趋势,残留稳定性和冻融劈裂强度比呈单峰增加的变化趋势,而最大弯拉应变呈平缓加速减小的趋势,但表面渗水系数和构造深度无明显变化。这表明 VRA 可有效增强其改性沥青混合料的高温稳定性、水稳定性和抗疲劳性能,但对低温抗裂性能有不利影响,而几乎不影响表面渗水性能和抗滑性能。

总体来看,VRA 是一种较适宜应用于南方地区的天然沥青改性剂。根据试验结果,建议其适宜的掺量范围为改性沥青混合料质量的 0.25%~0.75%。未来有必要结合工程实践来研究其改性沥青路面的实际应用效果。

〔参考文献〕

- [1] 李瑞霞,郝培文,王春,等. 布敦岩沥青改性机理[J]. 公路交通科技,2011,28(12):16-20,38.
LI Rui-xia, HAO Pei-wen, WANG Chun, et al. Modified mechanism of Buton rock asphalt[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2011,28(12):16-20,38.
- [2] Kok B V, Yilmaz M, Guler M. Evaluation of high temperature performance of SBS+Gilsonite modified binder [J]. Fuel,2011,90(10):3093-3099.
- [3] 吕松涛,郑健龙. 新疆岩沥青改性沥青混合料疲劳性能
- 的试验研究[J]. 交通科学与工程,2012,28(1):16-20.
LV Song-tao, ZHENG Jian-long. Research on fatigue character tests of asphalt mixtures modified by Xinjiang rock asphalt[J]. Journal of Transport Science and Engineering,2012,28(1):16-20.
- [4] Nasrekani A A, Naderi K, Nakhaei M, et al. High-temperature performance of gilsonite-modified asphalt binder and asphalt concrete[J]. Liquid Fuels Technology,2016,34(21):1783-1789.
- [5] 李立寒,孙艳娜,王飞. 岩沥青对软硬沥青复配混合料的增强作用[J]. 建筑材料学报,2013,16(6):1087-1091.
LI Li-han, SUN Yan-na, WANG Fei. Enhancement effect of rock asphalt on mixture of soft asphalt and hard asphalt compound binder [J]. Journal of Building Materials,2013,16(6):1087-1091.
- [6] 刘黎萍,秦钜泽,洪奕尚. 布敦岩沥青混合料拌和工艺优化研究[J]. 公路,2018(2):52-57.
LIU Li-ping, QIN Ju-ze, HONG Yi-shang. Research on optimization of mixing process of asphalt mixture containing Buton rock asphalt (BRA) [J]. Highway,2018(2):52-57.
- [7] 黄文通,徐国元. 北美岩沥青改善混合料水稳定性的机理分析[J]. 公路,2014(2):159-163.
HUANG Wen-tong, XU Guo-yuan. Mechanism analysis on water stability of asphalt mixtures modified by Uintaite [J]. Highway,2014(2):159-163.
- [8] 查旭东,白璐,王玮. BRA 改性沥青混合料路用性能研究[J]. 交通科学与工程,2009,25(1):10-13.
ZHA Xu-dong, BAI Lu, WANG Wei. Study of pavement performance for BRA modified asphalt mixture [J]. Journal of Transport Science and Engineering,2009,25(1):10-13.
- [9] 陆学元,凌东强,胡应德. 布敦沥青岩特性与技术标准研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2018,37(8):37-48.
LU Xue-yuan, LING Dong-qiang, HU Ying-de. Characteristics and technology standard of Buton-asphalt-rock [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science,2018,37(8):37-48.
- [10] 宋小金,樊亮,申全军. 国产天然岩沥青改性沥青混合料路用性能研究[J]. 公路,2009(12):135-139.
SONG Xiao-jin, FAN Liang, SHEN Quan-jun. A study on pavement performance of Chinese-made natural rock asphalt modified asphalt mixture [J]. Highway,2009(12):135-139.

(下转至第 51 页)

- xiang. The impact of ATIS on road network capacity [J]. Systems Engineering, 2015, 33(10): 155-158.
- [5] Bifulco G N, Cantarella G E, Simonelli F, et al. Advanced traveller information systems under recurrent traffic conditions: network equilibrium and stability [J]. Transportation Research Part B, 2016(92): 73-87.
- [6] Lavasani M, Jin Xia, Du Yi-Man. Market penetration model for autonomous vehicles based on previous technology adoption experiences [J]. Transportation Research Board, 2016, 2597(16): 67-74.
- [7] Chen Z B, He F, Zhang L H, et al. Optimal deployment of autonomous vehicle lanes with endogenous market penetration [J]. Transportation Research Part C, 2016(72): 143-156.
- [8] Levin M W, Kockelman K M, Boyles S D, et al. A general framework for modeling shared autonomous vehicles with dynamic network-loading and dynamic ride-sharing application [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2017(64): 373-383.
- [9] Levin M W. Congestion-aware system optimal route choice for shared autonomous vehicles [J]. Transportation Research Part C, 2017(82): 229-247.
- [10] Bagloee S A, Sarvi M, Patriksson M, et al. A mixed user-equilibrium and system-optimal traffic flow for connected vehicles stated as a complementarity problem [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32(7): 562-580.
- [11] Chen Z B, He F, Zhang L H, et al. Optimal design of autonomous vehicle zones in transportation networks [J]. Transportation Research Part B, 2016(99): 44-61.
- [12] Bagloee S A, Tavana M, Asadi M, et al. Autonomous vehicles: challenges, opportunities, and future implications for transportation policies [J]. Transport, 2016, 24(4): 284-303.
- [13] Wang H, Zhang X N. Joint implementation of tradable credit and road pricing in public-private partnership networks considering mixed equilibrium behaviors [J]. Transportation Research Part E, 2016(94): 158-170.

(上接第 8 页)

- [11] 李宏亮, 刘涛, 谢海巍. 新疆乌尔禾岩沥青改性沥青的试验研究 [J]. 公路工程, 2009, 34(6): 58-63.
LI Hong-liang, LIU Tao, XIE Hai-wei. Xinjiang Wuerhe rock asphalt modified asphalt experimental study [J]. Highway Engineering, 2009, 34(6): 58-63.
- [12] 查旭东, 胡锦涛, 刘安辉, 等. 布敦岩沥青材料性质试验分析 [J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2017, 14(4): 10-17.
ZHA Xu-dong, HU Jin-xiang, LIU An-hui, et al. Experimental analysis on material properties for Buton rock asphalt [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science, 2017, 14(4): 10-17.
- [13] 辛星, 刘明, 张新农, 等. 不同品种岩沥青对沥青混合料性能的影响研究 [J]. 石油沥青, 2012, 26(2): 11-16.
XIN Xing, LIU Ming, ZHANG Xin-nong. Influence of different kinds of rock asphalt on the performance of asphalt mixture [J]. Petroleum Asphalt, 2012, 26(2): 11-16.
- [14] 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 Guo-sen. Effects of manufacturing process of different modified asphalt on mixture properties [J]. Modern Transportation Technology, 2007, 4(3): 12-14.
- [15] 查旭东, 钱光耀, 张云帆. BRA 改性沥青混合料 AC-13C 适宜掺量的研究 [J]. 交通科学与工程, 2015, 31(2): 1-5, 33.
ZHA Xu-dong, QIAN Guang-yao, ZHANG Yun-fan. Research on suitable mixing amount for BRA modified asphalt mixture AC-13C [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2015, 31(2): 1-5, 33.
- [16] 宋亮亮, 姚晓光. 天然沥青混合料路用性能研究 [J]. 石油沥青, 2017, 31(1): 7-13.
SONG Liang-liang, YAO Xiao-guang. Research on pavement performance of natural asphalt mixture [J]. Petroleum Asphalt, 2017, 31(1): 7-13.
- [17] 邓杰元. 委内瑞拉岩沥青(VRA)改性沥青及其混合料性能研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.
DENG Jie-yuan. Research on performances of modified asphalt and its mixture for Venezuela rock asphalt (VRA) [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2018.