

文章编号:1672-9331(2020)04-0001-08

不同沥青结合料的 PAC-13 混合料性能研究

李闯民,李士东,柯 望

(长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

摘 要: 为了研究高黏沥青结合料对透水混合料的影响,通过 TPS、HVA 及成品高黏改性沥青对 PAC-13 混合料进行设计及级配优选。采用析漏及飞散试验确定最佳油石比,并进行了路用性能的分析。在试验中纤维用量为混合料总量的 0.3%,并与不加纤维的混合料的路用性能进行了对比分析。结果表明:采用空隙率、连通空隙率等技术指标确定三种混合料 $10\text{ mm}<\text{粒径}\leq 15\text{ mm}$ 、 $5\text{ mm}<\text{粒径}\leq 10\text{ mm}$ 、 $0<\text{粒径}\leq 5\text{ mm}$ 及矿粉的级配组合均为 57%:30%:10%:3%,结合经济成本推荐选取该级配组合;掺加纤维可改善混合料的高、低温性能及透水性能;三种混合料的综合性能为:成品高黏改性沥青混合料>TPS 高黏改性沥青混合料>HVA 高黏改性沥青混合料;采用水泥等量替换 2%的矿粉,混合料的性能改善明显;采用 HVA 高黏改性沥青进行 PAC-13 表面层混合料的设计与施工,这将为透水路面的建设提供一定的参考。

关键词: 道路工程;高黏改性沥青;PAC-13 沥青混合料;析漏及飞散试验;路用性能;经济分析

中图分类号:U416

文献标志码:A

Study on performance of PAC-13 mixture with different asphalt binders

LI Chuang-min, LI Shi-dong, KE Wang

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to study the influence of high viscosity asphalt binders on the permeable mixture, design and grading optimization of PAC-13 mixture were carried out through the use of TPS, HVA and finished high viscosity modified asphalt. The optimum oil-stone ratio was determined through leakage and scattering test, and the road performance was analyzed. The amount of fiber used in the test was 0.3% of the total amount of the mixture, and the pavement performance of the mixture without fiber was compared and analyzed. The research results show that the grading combination of $10\text{ mm}<\text{particle size}\leq 15\text{ mm}$, $5\text{ mm}<\text{particle size}\leq 10\text{ mm}$, $0<\text{particle size}\leq 5\text{ mm}$ and mineral powder of the three mixtures all is 57%:30%:10%:3% determined by the technical indicators such as voidage and connected void fraction. Considering economic cost, it is recommended to choose the grading combination. The high temperature stability, low temperature performance and

收稿日期:2020-06-07

基金项目:长沙理工大学研究生实践创新与创业能力提升计划项目(SJCX201911);江西省科技厅科技项目(2020H0023)

通讯作者:李闯民(1965—),男,湖南宁乡人,长沙理工大学教授,主要从事路基、路面工程方面的研究。

E-mail:13875908009@126.com

permeability of the mixture can be ameliorated by adding fiber. The comprehensive performance of the three mixtures is sorted into finished high viscosity modified asphalt mixture > TPS high viscosity modified asphalt mixture > HVA high viscosity modified asphalt mixture. The performance of the mixture can be improved significantly through replacing 2% of the mineral powder with identical amount of cement. Using HVA high viscosity modified asphalt in the design and construction of PAC-13 surface layer mixture could provide a certain reference for the construction of permeable pavement.

Key words: road engineering; high viscosity modified asphalt; PAC-13 asphalt mixture; leakage and scattering test; road performance; economic analysis

南方地区多雨,若路面排水不畅会影响行车安全,而透水性路面被认为是解决此问题的有效措施。透水沥青路面不仅可以降低噪声,还可以快速排出路表面积水,从而有效改善道路行驶的安全性和舒适性^[1]。透水沥青路面具有较高的空隙率,因此与传统路面相比,其强度较低,使用寿命较短。基于上述原因,国内外学者从沥青胶结料方面对透水沥青路面进行了研究,并认为高黏度结合料可以改善沥青胶结料与矿料的黏结,可以保证路面的强度并延长其使用寿命。

Francesco 等^[2]将超改性沥青黏合剂用于排水沥青混合料,并采用直接拉伸试验和数字图像关联对混合料的开裂进行研究,结果表明使用超改性沥青黏合剂的排水混合料性能较优;Liao 等^[3]使用高黏度沥青制备多孔沥青混合料,并对其车辙行为进行研究,结果显示随着沥青黏度的增大,多孔沥青混合料的耐车辙性得到明显改善;符刘旭^[4]使用 TPS 及橡胶粉改性剂制备改性沥青,并用于制备透水沥青混合料,通过性能分析,认为两种改性剂均可改善混合料的各项路用性能,且 TPS 改性效果较好;范子然等^[5]基于三大指标、60℃动力黏度、PG 分级等试验,研究国产 TPS、HVA 高黏剂在不同掺量下对基质沥青的性能影响,结果显示在同等掺量下,HVA 高黏改性沥青的各项基本性能均优于 TPS 高黏改性沥青,并综合各项指标确定二者的最佳掺量;赵济平^[6]结合常用矿料及沥青,通过添加 HVA 改性剂研究透水沥青混合料的性能,结果表明使用该改性剂的混合料的耐久性能得到明显改善;冯芳^[7]对改性沥青及基质沥青进行试验研究,并对比分析

混合料的高温性能,结果表明改性沥青的抗车辙性能优于基质沥青。

通过在基质沥青中添加改性剂制得高黏改性沥青,可提高沥青与集料间的黏附性,减少路面石料剥落、飞散等现象的发生,从而提高路面的使用寿命。本研究通过在基质沥青中分别添加 TPS、HVA 改性剂,结合成品高黏改性沥青进行配合比设计;通过试验进行对比分析,最后结合路用性能及经济成本推荐一种适用于透水沥青路面的高黏改性沥青混合料。

1 原材料

本试验的粗集料采用萍乡辉岩建材厂生产的辉绿岩,粒径范围为 5~10 mm 和 10~15 mm,细集料采用湘东料场生产的机制砂,填料为杨梅岭产的石灰岩矿粉。相关技术指标参照《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004),技术指标检测结果见表 1 和表 2。

本研究使用的沥青结合料共有三种,分别为成品高黏改性沥青和在基质沥青中分别掺加 TPS、HVA 高黏剂所得的两种改性沥青。根据文献^[5]确定 TPS、HVA 高黏剂的掺量分别为:TPS 高黏剂为 20%,HVA 高黏剂为 14%。高黏剂的相关技术指标参照《沥青混合料改性添加剂》(JT/T860.2-2013);沥青相关技术指标参照《透水沥青路面技术规程》(CJJ/T 190-2012);纤维采用絮状木质素纤维,相关技术指标参照《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004)。检测结果见表 3~5。

表 1 集料技术指标检测结果

Table 1 Test results of technical indexes of aggregate

集料类别	技术指标	技术要求	检测结果		
			0<粒径	4.75 mm<粒径	9.5 mm<粒径
			≤4.75 mm	≤9.5 mm	≤16.0 mm
粗集料	表观相对密度	≥2.600	—	2.922	2.795
	吸水率/%	≤2.00	—	1.13	0.41
	压碎值/%	≤26.0	—	—	12.3
	洛杉矶磨耗损失/%	≤28.0	—	15.6	12.7
	小于 0.075 mm 颗粒含量(水洗法)/%	≤1.0	—	0.3	0.2
	针片状颗粒含量/%	≤10.0	—	4.1	6.5
细集料	表观相对密度	≥2.500	2.735	—	—
	砂当量/%	≥60	67	—	—

表 2 矿粉技术指标检测结果

Table 2 Test results of technical indexes of mineral powder

项目	表观密度/ (×10 ³ kg·m ⁻³)	亲水 系数	含水 量/%	塑性指 数/%	粒度范围/%			外观
					<0.6 mm	<0.15 mm	<0.075 mm	
技术要求	≥2.500	<1.0	≤1.0	<4.0	100	90~100	75~100	无团粒结块
检测结果	2.672	0.8	0.3	2.8	100	93.1	84	无团粒结块

表 3 高黏改性沥青技术指标检测结果

Table 3 Test results of technical indexes of high viscosity modified asphalt

技术指标	技术要求	检测结果		
		TPS 高黏改性沥青	HVA 高黏改性沥青	成品高黏改性沥青
针入度(25 ℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	≥40	45	46	45
软化点/℃	≥80.0	94.8	96.5	95.6
延度(5 ℃)/cm	≥30.0	45.9	48.8	48.4
动力黏度(60 ℃)/(Pa·s)	≥50 000.0	186 274.8	117 811.3	51 322
黏韧性/(N·m)	≥20.0	31.1	31.9	30.6
韧性/(N·m)	≥15.0	21.8	23.2	21.5
RTFOT 后质量变化/%	≤0.6	0.0	0.0	0.1
RTFOT 后残留针入度比/%	≥65.0	74.4	80.2	84.4

表 4 高黏剂技术指标检测结果

Table 4 Test results of technical indexes of high viscosity agent

技术指标	技术要求	高黏剂	
		TPS	HVA
密度/(g·cm ⁻³)	0.96~1.02	0.97	1.01
灰分/%	≤0.5	0.1	0.1
熔融指数/[g·(10 min) ⁻¹]	≥5.0	7.5	8.2
300%定伸拉力/MPa	≤0.5	0.3	0.2
伸长率/%	≥800	1 258	1 349

表 5 纤维技术指标检测结果

Table 5 Test results of technical indexes of fiber

技术指标	技术要求	检测结果
外观	—	灰色絮状
灰分含量/%	18.0±5.0	19.5
pH 值	7.5±1.0	6.6
含水率(以质量计)/%	≤5.0	3.5
吸油率/倍	≥纤维质量的 5 倍	5.32

高黏剂是经过加工后制备而成的颗粒状改性材料,可有效增大沥青的绝对黏度,增强沥青与集料间的黏附,且对混合料的性能具有改善效果^[8]。由表 3 可知,三种高黏改性沥青的指标均满足规范要求,TPS,HVA 高黏改性沥青的 60 ℃ 动力黏度较大。

2 配合比设计

2.1 矿料级配的确定

选定目标空隙率为 21%,透水沥青混合料的技术要求参照《透水沥青路面技术规程》(CJJ/T 190-2012)。参考 OGFC 配合比设计方法,进行 PAC-13 混合料的设计,结果见表 6。研究表明:2.36 mm 筛孔对透水沥青混合料空隙率的影响最为明显^[9]。

表 6 PAC-13 混合料合成级配结果

Table 6 Synthetic grading results of PAC-13 mixture			
筛孔尺寸/ mm	不同级配下的筛孔通过率/%		
	1	2	3
16	100.0	100.0	100.0
13.2	96.6	96.8	96.9
9.5	59.7	61.8	63.9
4.75	23.5	26.5	29.4
2.36	12.5	15.0	17.4
1.18	10.0	11.6	13.3
0.6	8.1	9.3	10.4
0.3	6.2	6.7	7.3
0.15	5.2	5.6	6.0
0.075	4.4	4.6	4.8

在表 6 所列的混合料级配 1 中,10 mm<粒径≤15 mm、5 mm<粒径≤10 mm、0<粒径≤5 mm 及矿粉的比例为 57%:30%:10%:3%,在级配 2 中的比例为 54%:30%:13%:3%,在级配 3 中的比例为 51%:30%:16%:3%。

根据表 6 所列各级配的筛孔通过率,使用经验公式计算对应的预估沥青用量,并得到相应的油石比,分别为 5.1%,5.5%,5.9%。根据预估的油石比,采用三种级配分别对成品高黏改性沥青、TPS 高黏改性沥青及 HVA 高黏改性沥青进行马

歇尔试件的制作,并测定试件的稳定度、流值、空隙率及连通空隙率等技术指标,试验中纤维用量为混合料总质量的 0.3%,试验结果见表 7。相关技术要求参照《透水沥青路面技术规程》(CJJ/T 190-2012)。最终选定级配 1。

表 7 三种级配的马歇尔试件测试结果

Table 7 Test results of Marshall specimens of three kinds of gradation

级配	结合料类别	稳定度/kN	流值/mm	空隙率/%	连通空隙率/%
1	成品改性沥青	7.15	3.97	20.9	15.0
	TPS 改性沥青	6.40	3.93	21.6	15.5
	HVA 改性沥青	6.62	3.54	21.3	15.2
2	成品改性沥青	6.13	5.58	18.8	14.2
	TPS 改性沥青	5.43	4.95	20.1	14.9
	HVA 改性沥青	5.58	5.12	19.5	14.6
3	成品改性沥青	4.52	6.82	17.6	12.4
	TPS 改性沥青	4.94	6.41	18.6	13.5
	HVA 改性沥青	4.82	6.92	18.4	13.0
技术要求		≥5	2~4	18~25	≥14

2.2 确定最佳油石比

在透水沥青混合料配合比设计中,在进行马歇尔试验时,稳定度、毛体积密度与油石比之间的关系曲线不存在峰值,无法采用传统的马歇尔试验法确定最佳油石比^[10]。透水沥青混合料最佳油石比的确定方法主要为析漏和飞散试验^[11]。以预估的油石比 5.1%为基础,以 0.5%的等差选取五组油石比,分别对三种混合料进行析漏和飞散试验,结果见图 1~3。由图 1~3 可知,成品高黏改性沥青混合料的最佳油石比范围为 4.9%~5.3%;TPS 高黏改性沥青混合料的最佳油石比范围为 4.9%~5.2%;HVA 高黏改性沥青混合料的最佳油石比范围为 4.8%~5.2%。

3 路用性能的对比分析

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011),采用确定的最佳级配及油石比分别对三种高黏改性沥青混合料做透水性能、高温性能、低温性能及水稳定性能试验。试验中成

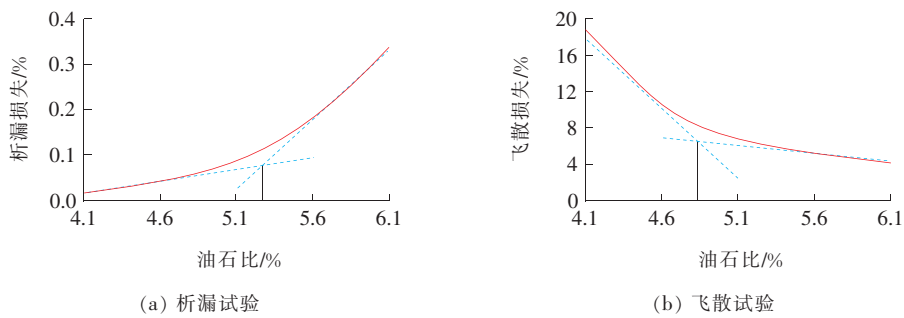


图 1 成品高黏改性沥青混合料析漏和飞散试验的试验结果

Fig. 1 Results of leakage and scattering test of finished high viscosity modified asphalt mixture

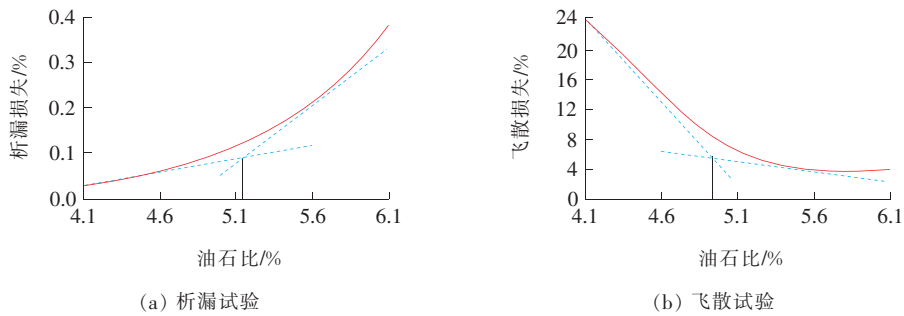


图 2 TPS 高黏改性沥青混合料析漏和飞散试验的试验结果

Fig. 2 Results of leakage and scattering test of TPS high viscosity modified asphalt mixture

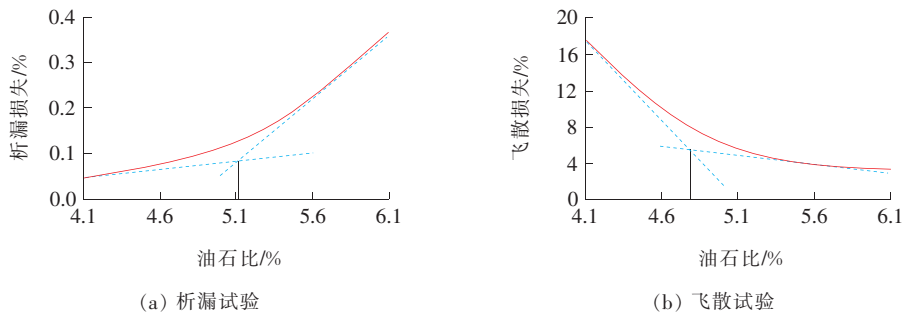


图 3 HVA 高黏改性沥青混合料析漏和飞散试验的试验结果

Fig. 3 Results of leakage and scattering test of HVA high viscosity modified asphalt mixture

品高黏改性沥青、TPS 高黏改性沥青及 HVA 高黏改性沥青的油石比分别采用 5.1%, 5.1%, 5.0%。试验组木质素纤维用量为混合料总质量的 0.3%, 对照组不参加纤维。

3.1 透水性能

透水沥青路面的排水特性, 主要归功于其内部大空隙的存在。混合料内部空隙率越大, 则渗透系数越大, 路面的排水性能也越好^[12]。使用密封材料将渗水仪固定在碾压成型的混合料车辙板试件上, 测定不同混合料的渗水系数, 试验结果如表 8 所示。

表 8 渗水系数测定结果				
Table 8 Test results of seepage coefficient				
试验组别	结合料类别	空隙率/%	连通空隙率/%	渗水系数/[mL · (15 s) ⁻¹]
试验组	成品改性沥青	20.9	15.3	1 422
	TPS 改性沥青	21.1	15.2	1 165
	HVA 改性沥青	20.8	14.7	1 085
对照组	成品改性沥青	20.5	14.9	1 245
	TPS 改性沥青	20.5	14.5	1 043
	HVA 改性沥青	19.9	14.2	988

由表 8 可知,两组测试结果显示混合料的空隙率、连通空隙率及渗水系数均满足要求,且掺加纤维后混合料的渗水系数增大。这主要是因为掺加纤维使混合料中自由沥青的数量有所减少,内部空隙有所增多,混合料的排水性能也因此有所提高。成品高黏改性沥青混合料的连通空隙率在三者中最大,其透水性能也最好,其次为 TPS 高黏改性沥青混合料,再次为 HVA 高黏改性沥青混合料。由此表明,连通空隙率与渗水系数之间存在正相关关系,即连通空隙率越大,透水性能越好。

3.2 高温性能

透水沥青混合料的高温性能主要通过车辙试验进行测定,并以动稳定度作为评价指标^[1]。动稳定度越大,路面的抗车辙性能越好,试验结果如表 9 所示。由表 9 可知,对于试验组与对照组,成品高黏改性沥青混合料的动稳定度均最大,即其高温性能最好,其次为 TPS 高黏改性沥青混合料,再次为 HVA 高黏改性沥青混合料。掺加 TPS 和 HVA 高黏剂的改性沥青混合料的高温性能与成品高黏改性沥青混合料相比较差,但仍满足技术要求。掺加纤维的透水沥青混合料动稳定度均大于未掺加纤维混合料的动稳定度,表明在透水沥青混合料中添加纤维可有效改善混合料的抗车辙性能。

表 9 车辙试验结果
Table 9 Results of rutting test 次/mm

结合料类别	动稳定度	
	试验组	对照组
成品改性沥青	4 737	4 357
TPS 改性沥青	4 117	3 684
HVA 改性沥青	4 038	3 621

3.3 低温性能

在低温条件下,沥青混合料内部会产生温度应力。当温度变化较大时,如果温度应力增长的速度比应力松弛的速度大,温度应力不断积聚并超过抗拉极限时便会产生开裂^[13]。采用低温弯曲试验测得抗弯拉强度、弯拉应变及弯拉劲度模量来评价混合料的低温性能,试验结果见表 10。

透水沥青路面的低温性能受多种因素的综合

影响。相关研究表明,当弯拉应变不小于 2 500 $\mu\epsilon$ 时^[14],透水沥青混合料表现出较好的低温性能。由表 10 可知,对每一种结合料,试验组的弯拉应变均大于对照组的值。在试验组中,三种改性沥青混合料的弯拉应变均大于 2 500 $\mu\epsilon$,但成品改性沥青的低温性能相对来说最好。

表 10 低温弯曲试验结果
Table 10 Results of low temperature bending test $\mu\epsilon$

结合料类别	弯拉应变	
	试验组	对照组
成品改性沥青	3 819	3 522
TPS 改性沥青	3 352	3 068
HVA 改性沥青	3 288	2 946

3.4 水稳定性能

与普通密级配沥青路面相比,透水沥青路面由于其特有的大空隙结构,在使用过程中受到动水压力的影响更容易发生水损破坏^[15]。本研究采用浸水马歇尔残留稳定度、冻融劈裂比来测试混合料的水稳定性能,试验结果如表 11 所示。

表 11 浸水马歇尔及冻融劈裂试验结果
Table 11 Results of immersion Marshall and freeze-thaw splitting test %

结合料类别	试验组		对照组	
	残留稳定度	冻融劈裂比	残留稳定度	冻融劈裂比
成品改性沥青	87.5	85.8	86.7	84.4
TPS 改性沥青	84.9	82.9	84.8	81.5
HVA 改性沥青	83.5	82.0	83.2	80.7

由表 11 可知,同一沥青结合料试验组与对照组的残留稳定度、冻融劈裂比之间无明显差距,说明掺加纤维对改善混合料的水稳定性能效果不明显;在三种改性沥青混合料中,仅成品高黏改性沥青混合料的残留稳定度满足不小于 85%的技术要求,同时该混合料仅试验组的冻融劈裂比满足不小于 85%的技术要求,其余均不满足。

为改善 TPS,HVA 高黏改性沥青混合料的水稳定性能,本试验选用水泥代替部分矿粉。水泥为中材萍乡水泥有限公司生产的 PO32.5 普通硅

酸盐水泥,其技术指标符合规范要求。试验设计方案为:PAC-1 为矿粉 3%,水泥 0;PAC-2 为矿粉 2%,水泥 1%;PAC-3 为矿粉 1%,水泥 2%。选用级配 1 配制 HVA 高黏改性沥青混合料,在试验中纤维用量为 0.3%,评价指标为冻融劈裂比、残留

稳定度,试验结果见图 4。由图 4 可知,对于试验设计方案 PAC-3,即采用 2%的水泥代替等量矿粉,掺加纤维混合料的冻融劈裂比和残留稳定度有显著改善,说明沥青混合料的水稳定性能得到了提高,其路用性能较之前也有所提高。

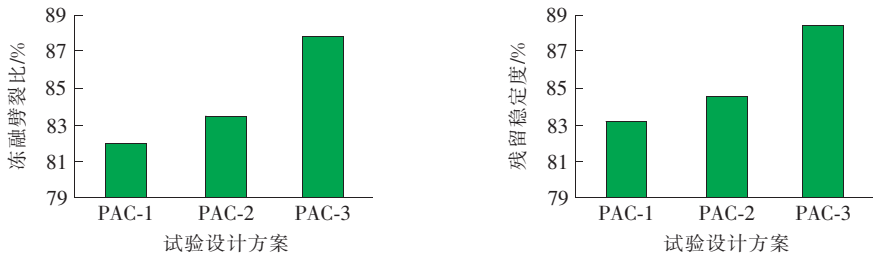


图 4 不同试验设计方案的试验结果

Fig. 4 Test results of different test design schemes

4 经济分析

在实际施工过程中,应同时考虑混合料的路用性能与经济成本。由掺加纤维与未掺加纤维混合料路用性能的测试结果可知,掺加纤维的三种混合料的高、低温性能及排水性能均得到改善。本研究对掺加纤维混合料的情况进行经济分析,其中组合 1~3 所使用的沥青分别为成品高黏改性沥青、TPS 高黏改性沥青、HVA 高黏改性沥青,其余原材料均相同且均采用级配 1。通过调查各原材料的市场单价,分析并计算出不同组合下每 1 000 kg 混合料的价格,见表 12。

由表 12 可知,三种组合的价格高低依次为第 1 种、第 2 种、第 3 种,且混合料性能均满足要求,但第 1,2 种组合的成本与第 3 种相比较高。综合考虑混合料的性能及成本,选定第 3 种组合进行 PAC-13 表面层透水沥青混合料的生产与施工。

5 结论

1) 以空隙率、连通空隙率等技术指标综合确定成品高黏改性沥青、TPS 高黏改性沥青及 HVA 高黏改性沥青的混合料矿料级配均为级配 1,采用析漏及飞散试验确定最佳油石比,其范围分别为 4.9%~5.3%,4.9%~5.2%,4.8%~5.2%。

2) 基于确定的矿料级配及三种结合料分别对应的油石比,研究了掺加纤维的混合料的路用性能,并与未掺加纤维的混合料的路用性能进行了对比分析。结果表明:掺加纤维可改善混合料的高、低温性能及排水性能;三种混合料的综合性能依次为成品改性沥青>TPS 改性沥青>HVA 改性沥青;采用 2%的水泥等量替换矿粉进行试验,混合料的性能得到明显改善。

3) 通过经济分析并结合路用性能,对于表面层透水沥青路面施工的 PAC-13 混合料,推荐选取的组合为:10 mm<粒径≤15 mm、5 mm<粒径≤10 mm、0<粒径≤5 mm 及矿粉的比例为 57% : 30% : 10% : 3%,HVA 高黏剂掺量 14%,油石比 5.0%,使用 2%的水泥代替部分矿粉,纤维用量 0.3%。

表 12 不同组合下透水沥青混合料组合价格对比				
Table 12 Combination price comparison of permeable asphalt mixture based on different combinations				
原材料	单价/ (元·t ⁻¹)	不同组合下原材料的含量/kg		
		1	2	3
辉绿岩	240	823.153	823.153	824.021
机制砂	120	94.615	94.615	94.715
矿粉	140	28.385	9.462	9.472
水泥	480	—	18.923	18.943
絮状纤维	3 200	3.000	3.000	3.000
基质沥青	4 000	—	42.373	42.974
成品改性沥青	9 800	50.847	—	—
TPS 高黏剂	36 000	—	8.475	—
HVA 高黏剂	37 000	—	—	6.016
价格/(元·t ⁻¹)	—	720.8	703.5	623.6

〔参考文献〕

- [1] 徐洪跃. 透水沥青混合料透水特性及路用性能研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2018, 37(6): 42-47, 75.
XU Hong-yue. Research on permeability and road performance of permeable asphalt mixture[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2018, 37(6): 42-47, 75.
- [2] Francesco P, Stefano N, Corrado A, et al. Effect of hyper-modified asphalt binder and steel slags on cracking and rutting behaviour of wearing course mixtures[J]. Road Materials and Pavement Design, 2019, 20(2): 678-694.
- [3] Liao M C, Lin Y Y. Rutting performance of porous asphalt concrete for heavy duty pavement[J]. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2017, 12: 1 489-1 497.
- [4] 符刘旭. 高黏改性型透水沥青混合料路用性能及声发射特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
FU Liu-xu. Study on road performance and acoustic emission characteristics of high viscosity modified pervious asphalt mixture[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [5] 范子然, 李闯民. 高黏剂掺量对沥青的性能影响研究[J]. 交通科技与经济, 2019, 21(3): 73-80.
FAN Zi-ran, LI Chuang-min. Study on the effect of high viscosity additive on asphalt performance[J]. Transportation Technology and Economy, 2019, 21(3): 73-80.
- [6] 赵济平. HVA 高黏透水沥青路面技术的试验研究[J]. 市政技术, 2018, 36(2): 31-33.
ZHAO Ji-ping. Experimental study on HVA high viscosity permeable asphalt pavement technology[J]. Municipal Technology, 2018, 36(2): 31-33.
- [7] 冯芳. 透水路面高黏改性沥青的高低温性能评价[J]. 城市道桥与防洪, 2018(7): 285-288, 292.
FENG Fang. High and low temperature performance evaluation of high viscosity modified asphalt on permeable pavement[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2018(7): 285-288, 292.
- [8] 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, 30(4): 759-762.
CONG Zhuo-hong, WU Xi-rong, ZHENG Nan-xiang, et al. Influence of high viscosity modifier on asphalt performance[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2011, 30(4): 759-762.
- [9] 吴金荣, 马芹永. 集料对透水沥青混合料空隙率的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2015, 33(2): 279-282.
WU Jin-rong, MA Qin-yong. The effect of aggregate on the permeability of pervious asphalt mixture[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2015, 33(2): 279-282.
- [10] 孙爽. 透水沥青路面及路基力学响应研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2018.
SUN Shuang. Research on mechanical response of permeable asphalt pavement and subgrade [D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2018.
- [11] 同卫刚. 生态型透水沥青路面结构与性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
TONG Wei-gang. Research on structural design and performance of ecological pervious asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [12] 向浩, 何兆益, 陈柳晓, 等. 沥青混合料渗透性关键影响因素分析[J]. 公路, 2019(3): 28-32.
XIANG Hao, HE Zhao-yi, CHEN Liu-xiao, et al. Analysis of key influence factors of asphalt mixture permeability[J]. Highway, 2019(3): 28-32.
- [13] 曹佳伟, 袁子安, 杭志远, 等. 短切玄武岩纤维透水沥青混合料路用性能研究[J]. 价值工程, 2019(6): 102-104.
CAO Jia-wei, YUAN Zi-an, HANG Zhi-yuan, et al. Research on road performance of chopped basalt fiber pervious asphalt mixture[J]. Value Engineering, 2019(6): 102-104.
- [14] 陈俊青. 基于低温性能的沥青路面应用技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
CHEN Jun-qing. Research on asphalt pavement application technology based on low temperature performance[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [15] 吴军. 沥青结合料对排水沥青混合料路用性能的影响研究[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2017(8): 166-168.
WU Jun. Research on influence of asphalt binder on road performance of drainage asphalt mixture[J]. Highway Transportation Technology: Application Technology Edition, 2017(8): 166-168.