

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.06.043

# 基于抗滑性能的改进型多点支撑薄层罩面级配设计与性能研究

屈甜<sup>1</sup>, 刘一濛<sup>2</sup>, 谢清忠<sup>3</sup>, 吴燕春<sup>2</sup>, 张久鹏<sup>1</sup>(1.长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2.中交第四公路工程局有限公司 西安工程设计院;  
3.中交第四公路工程局有限公司)

**摘要:** 为了提高薄层罩面的抗滑性能,基于多点支撑骨架状态的混合料体积设计方法(V-S),引进7.1 mm的筛孔作为粗集料级配控制的筛孔尺寸。利用压碎筛分试验的方法重新确定了分界筛孔尺寸并进一步确定了试验级配。将设计级配与SMA-5进行高温性能、水稳性能和抗磨耗性能对比,结果表明:设计级配能够满足路用性能要求;利用小型加速磨耗仪对上述各级配进行长期抗滑性能试验,结果显示随着轮载次数的增加,摆值呈现出先短暂增大再快速变小最后趋于稳定的趋势;而其构造深度则随着轮载次数的增加不断减小,呈现出前期降低速率较快,后期基本稳定的趋势。综合路用性能和长期抗滑性能结果来看,5种级配的薄层罩面中HFC-3的综合性能最优。

**关键词:** 道路工程; 多点支撑级配设计; 抗滑性能; 薄层罩面; 路用性能

薄层罩面以其良好的路面构造深度和平整度恢复特性、显著的道路轻型病害修复特性、明显的行车噪音降低幅度及较低的建造成本在道路领域获得了广泛的应用。然而薄层罩面也存在一定的不足,主要表现在其功能特性的过早衰减,即罩面层的表面纹理在服役早期就被磨平,从而导致构造深度和平整度等功能显著下降,引起道路的抗滑性能不足。针对薄层罩面的功能性过度衰减问题,各国学者亦做了相关的研究。美国科氏公司研发了一种利用NovaBond作为黏结层并采用间断级配,通过热拌摊铺的NovaChip(改性超薄磨耗层)技术,获得了广泛的认可。印尼采用聚合物沥青(Superflex改性沥青)和特殊集料,制备了一种具有凹纹理且粗糙的超薄罩面层LASTIKA,南非亦制备出一种价格低廉、性能优良的开普封层。学术界对薄层罩面的研究不仅限于热拌沥青混合料,各国学者也对冷拌及温拌沥青混合料的薄层罩面进行深入挖掘。也有学者在薄层罩面中加入纳米TiO<sub>2</sub>降解汽车尾气,扩展了薄层罩面的使用。

基于多点支撑骨架状态的级配设计方法在众多薄层罩面改进技术中是一种较为新颖的设计方法,它包括主骨料空隙填充法(CAVF)和基于多点支撑骨架状

态的混合料体积设计法(V-S)。该文对V-S设计法在级配设计过程中进行适当的修正和改进,设计4种高磨阻薄层罩面(High Friction Course, HFC)的级配,并与SMA-5在路用性能和功能特性两方面进行比较,以得到较为显著的结果。

## 1 原材料

### 1.1 集料

选用公称最大粒径为7.1 mm的陕西产石灰岩集料,其基本性能见表1,与规范要求进行对比,其各性

表1 集料性能测试结果

测试指标	单位	测试结果
洛杉矶磨耗率	%	12.5
磨光值 PSV		46.0
压碎值	%	16.2
针片状含量	%	1.2
黏附性	级	5.0
坚固性	%	3.6
软石含量	%	3.3
水洗法<0.075 mm 颗粒含量	%	0.4
砂当量	%	65.6

收稿日期:2019-04-08

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(编号:2017M620434);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号:310821173501)

作者简介:屈甜,女,硕士研究生,E-mail:qutian6150@chd.edu.cn

能均满足使用要求。

1.2 沥青

采用国创 SBS I—C 型改性沥青,三大指标测试结果如表 2 所示。

2 多点支撑薄层罩面材料组成设计

2.1 多点支撑薄层罩面设计理论

一般来说,薄层罩面在服役期间整体保持良好的

抗滑性能,则需要将混合料设计成骨架嵌挤结构。目前,有两种设计方法对于集料形成骨架结构有所帮助,即 CAVF 法和 V—S 法。

CAVF 法主要利用粗集料的嵌挤能力,细集料、矿粉、沥青和设计空隙率的总体积不超过粗集料在堆积状态下的间隙率体积来进行设计。该方法存在的主要问题是由于经验值的引入导致级配设计具有随意性和不确定性,且该方法没有给出关于粗细集料各自级配的设计方法,从而限制了其在道路工程中的应用。

表 2 沥青三大指标测试结果

三大指标	单位	测试结果				规范要求	试验方法
		1	2	3	均值		
针入度(25℃,100 g,5 s)	0.1 mm	68.2	68.8	68.3	68.4	60~80	T0604—2011
延度(5℃)	cm	39.6	39.5	39.5	39.5	≥30	T0606—2011
软化点(环球法)	℃	70.2	70.6	—	70.4	≥55	T0605—2011

V—S 设计方法认为当沥青混合料的最大公称粒径等于 7.1 mm 时,沥青混合料中粒径不小于 2.36 mm 的集料通过相互嵌挤便可以形成沥青混合料的基础骨架,而沥青混合料中粒径小于 2.36 mm 的集料以及填料则被当作填充材料补充于骨架中,从而形成整个混合料结构,沥青填充于更小间隙中,组成沥青混合料。可用式(1)~(3)进行计算。

$$G + g = 100\% \tag{1}$$

$$\frac{g}{\rho_g} = \frac{G}{\rho_s} \left( \frac{VCA - VMA}{100} \right) \tag{2}$$

$$\frac{P_a}{\rho_a} = \left( \frac{VMA - VV}{100} \right) \frac{G}{\rho_s} \tag{3}$$

式中:G 为沥青混合料中粗集料所占比例(%);g 为沥青混合料中细集料以及填料所占比例(%); $\rho_g$  为沥青混合料中细集料和填料混合后其混合物的密度(g/cm<sup>3</sup>); $\rho_s$  为沥青混合料中粗集料在紧密堆积状态下的密度(g/cm<sup>3</sup>);VCA 为沥青混合料中粗集料在紧密堆积状态下的空隙率(%);VMA 为沥青混合料的矿料间隙率(%); $P_a$  为沥青混合料中的油石比(%); $\rho_a$  为沥青密度(g/cm<sup>3</sup>);VV 为混合料空隙率(%)。

其中, $\rho_s$ 、 $\rho_g$ 、 $\rho_a$  以及 VCA 可以用试验方法测试得出,而 VMA 和 VV 是整个过程的两个核心参数,通过调整核心参数可以获得具有足够抗滑能力的沥青混合料,剩下的未知参数可以通过式(1)~(3)求得,即可获得配合比。

2.2 级配设计中的关键参数

(1) 7.1 mm 中间筛的加入

薄层罩面一般由于其自身特点的限制摊铺厚度都较薄,且由于自身抗滑特性的要求,相对来说粗集料比例都较多,而现行规范中用作薄层罩面的粗集料筛孔划分范围较大(例如 4.75~9.5 mm 的粒径),容易导致粗集料级配变异系数较大,对混合料的性能尤其是抗滑性能造成较大影响。为了更精确地控制粗集料的级配变化,研究中引入了 7.1 mm 的筛子进行控制。采用 7.1 mm 筛子对 4.75~9.5 mm 集料进行筛分,可得 4.75~7.1 mm 和 7.1~9.5 mm 的集料。

(2) 分界筛孔尺寸的确定

传统的分界筛孔尺寸是采用贝雷法级配设计理论分界筛孔的划分方法确定的,该方法对相对较细的集料适用性有限,且其在对粗细集料级配划分中起决定作用的填充方式中并没有体现。赵永利指出集料骨架特性可以采用压碎筛分试验的方法进行分析。由于压碎筛分试验体现了粗细集料在级配中的具体作用,该文采用压碎筛分试验(集料 3 kg,加载荷载 400 kN)来确定分界筛孔尺寸。图 1 为 4 种不同原始粒径的石灰岩经过 4 次压碎筛分试验得到的平均值。

由图 1 可以看出:4 种集料在试验后表现出 1.18~2.36 mm 集料占比与 2.36~4.75 mm 相比较小,且小于 1.18 mm 筛孔尺寸的集料占比都很小。由于外部压力主要由沥青混合料的骨架承受,而作为填充材料的细集料以及填料则几乎不受外力作用。所以,当沥青混合料的骨架在承受较大外力作用时容易产生颗粒破碎现象,然而作为填充材料的细集料则几乎不受

影响。由试验结果可知:在沥青混合料中不大于 2.36 mm 的集料几乎不发生破碎,其仅作为填充材料填充于骨架中。由此可知:可采用 2.36 mm 作为最大公称粒径为 7.1 mm 混合料的分界筛孔尺寸。

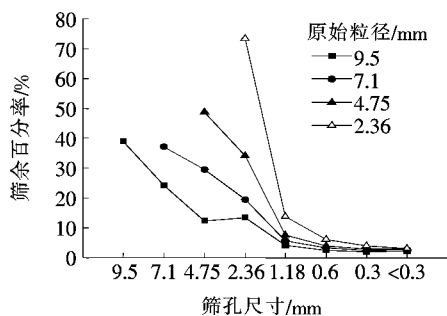


图 1 不同粒径集料的压碎筛分试验结果

### (3) 最大密实度填充理论的试验指数确定

对于沥青混合料中作为骨架结构填充材料的细集料以及填料,其级配按照最大密实度填充理论进行计算及设计,计算公式如下:

$$P_i = \left(\frac{d_i}{D}\right)^n \times 100\% \quad (4)$$

式中: $P_i$  为集料粒径  $d_i$  的通过百分率; $D$  为细集料颗粒的最大粒径即 2.36 mm; $n$  为试验指数。

根据传统最大密实度理论, $n$  的取值范围通常为 0.20~0.45,在 Superpave 中  $n$  的最佳取值为 0.45。刘长波提出  $n$  取值越大,沥青混合料抗滑性能越好。综上,若采用该理论, $n$  取值矛盾,故需另寻细集料级配设计方法。

通过图 1 可以发现,所有压碎筛分曲线从 1.18 mm 开始相似。故需进一步探究,将粒径不大于 1.18 mm 颗粒的通过百分率进行计算,计算结果如图 2 所示。

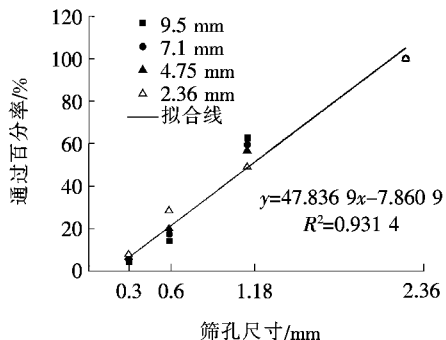


图 2 不同粒径颗粒破碎生成的细颗粒的级配拟合

由图 2 可知:不同粒径原始集料破碎后生成的细颗粒级配相似度较高,将 4 种原始集料的压碎筛分结果进行回归分析,结果表现为不同粒径颗粒破碎生成

的细颗粒通过筛孔百分率与筛孔尺寸有着明显的线性关系。

集料在进行压碎试验时,发生破碎并不是一个偶然事件,其本质上存在一定规律,即作为沥青混合料骨架的粗集料在发生破碎时,所产生的细小颗粒总量会随着外部压力的增大而持续增加,但是无论细小颗粒的总量如何发生变化,在它们内部的比例关系却几乎保持一致。而此比例关系不仅代表一种集料稳定状态,同样能够将其视作一种级配进行处理。因此,可以将此比例应用到基于抗滑性能的改进型多点支撑薄层罩面体系设计中。

## 2.3 混合料设计

### (1) 粗集料组成

多点支撑骨架状态下的粗集料级配组成,在确定沥青和每一档集料密度的基础上,采用式(5)进行计算。在测试粗集料在单一粒径条件下的体积填充率  $v_0$  后,再计算每一档粗集料级配。采用试验方法测得 7.1~9.5 mm 集料的体积填充率为 58.09%。

$$v_1 = \frac{v_0}{\left(1 + \frac{d}{D}\right)^3} \quad (5)$$

式中: $v_0$  为粗一级颗粒单独填充时的填充率; $v_1$  为 V-S 模型中粗一级颗粒应占的体积百分率; $D$  为粗一级颗粒粒径; $d$  为细一级颗粒粒径。计算结果:粒径分别为 7.1、4.75、2.3 mm 时,所需体积填充率分别为 100%、87.51%、72.45%, $d/D$  分别为 0.669 0、0.5、0.5,各级集料体积填充率分别为 12.49%、15.06%、12.47%,筛余百分率分别为 31.21%、37.63%、31.16%。

### (2) 细集料和填料

矿粉的筛余百分率通过式(4)计算,细集料各档筛孔筛余百分率按图 2 的压碎试验得出的拟合公式得出。选取 4 种试验指数,即  $n$  分别取 0.25、0.30、0.35、0.40,设计细集料理论级配,结果如表 3 所示。

表 3 细集料理论级配

$n$	不同筛孔(mm)通过百分率/%					
	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
0.25	100	70.16	55.49	47.90	44.11	42.21
0.30	100	66.71	50.35	41.89	37.66	35.54
0.35	100	63.81	46.02	36.82	32.22	29.91
0.45	100	73.20	53.99	39.52	28.93	21.18

### (3) 级配组成

将  $n=0.25, 0.30, 0.35$  和  $0.45$  所对应的级配分别命名为 HFC-1、HFC-2、HFC-3 和 HFC-4。采用 Novachip-A 以及 SMA-5 两种级配与该文设计的级配进行对比研究,所有合成级配曲线见图 3。

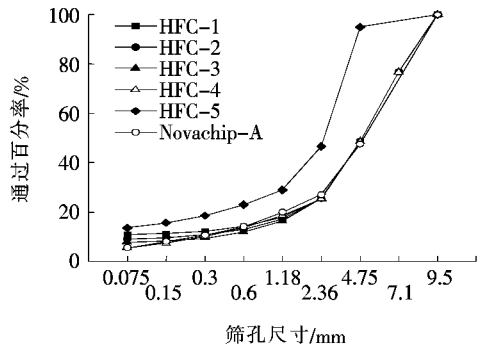


图 3 不同级配曲线

由图 3 可以看出:级配 HFC-1、HFC-2、HFC-3 和 HFC-4 与 Novachip-A 比较接近,特别是级配 HFC-3,它的级配曲线与 Novachip-A 的级配曲线基本一致。而 Novachip-A 级配已经被很多实体工程证实过其可靠性较高,故该文设计的改进型多点支撑薄层罩面级配具有理论上的可行性。

(4) 确定粗集料的紧密堆积密度  $\rho_s$ 、间隙率 VCA

粗集料的紧密堆积状态通过单面击实的方法得到,在对粗集料进行 100 次击实后即可得到此状态。此状态时粗集料堆积密度  $\rho_s$  及间隙率 VCA 为: $\rho_s = 1.675 \text{ g/cm}^3$ ,  $VCA = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_g}\right) \times 100\% = 39.07\%$ 。

(5) 基于抗滑性能确定沥青混合料的体积参数要求

依据该文的设计初衷,考虑适当增加空隙率以提高薄层罩面的抗滑性能,故选取  $VV=4.5\%$ 。按照规范的规定要求,在此沥青混合料试件空隙率条件下,密级配沥青混合料矿料间隙率即其 VMA 最低值应不小于  $17.5\%$ ,但是考虑到骨架密实型沥青混合料的矿料间隙率一般情况下均比较高,故研究中采用沥青混合料矿料间隙率  $VMA=18\%$  作为设计参数。

(6) 油石比的确定

将所确定的参数代入式(1)~(3),即可求得混合料中粗集料用量、细集料用量以及油石比,其结果见表 4。

其最佳油石比通过马歇尔试验确定,最终确定的 HFC-1、HFC-2、HFC-3 和 HFC-4 的最佳油石比分别为  $5.73\%$ 、 $6.18\%$ 、 $6.58\%$  和  $6.09\%$ 。

表 4 粗、细集料用量以及油石比结果

$n$	粗集料含量/%	细集料含量/%	油石比/%
0.25	74.56	25.44	6.23
0.30	74.51	25.49	6.23
0.35	74.46	25.54	6.22
0.45	74.62	25.38	6.24

### 3 性能研究

#### 3.1 高温性能

图 4 为高温性能测试结果。

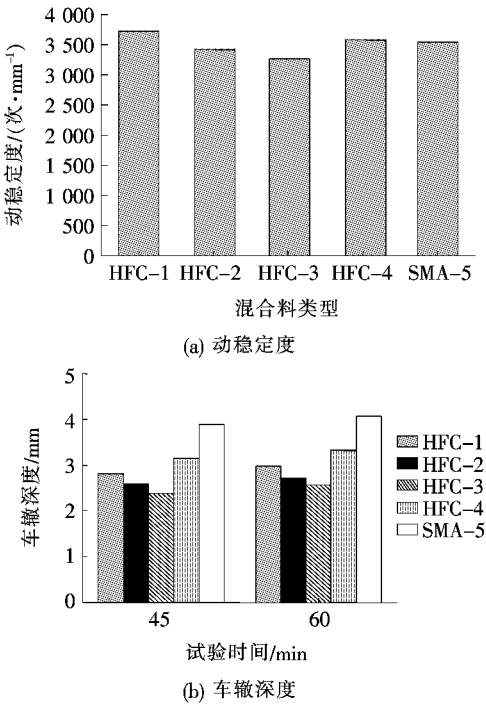


图 4 车辙试验结果

由图 4 可以看出:所有沥青混合料的动稳定度远高于  $2800 \text{ 次/mm}$ ,达到标准。针对 HFC-1、HFC-2 和 HFC-3 这 3 种沥青混合料,其油石比依次增大,导致沥青膜依次增厚和流动变形依次增加。同时,这 3 种级配依次增粗,不可避免地导致这 3 种沥青混合料的空隙率同样依次变大,自然这 3 种沥青混合料的动稳定度会依次减小,但不难发现,这 3 种沥青混合料的试验车辙深度都比较低,证明这 3 种沥青混合料的级配骨架较好。

#### 3.2 水稳性能

图 5 为水稳性能测试结果。

由图 5 可以看出:所有测试混合料的浸水残留稳

定度及其冻融劈裂强度比均能满足路用性能要求。在所有参与测试的混合料中, HFC-3 的试验数据均最低, 分析其原因, 是由于其采用的细级配比较粗导致的。较粗的细级配会引起该种混合料空隙率变大, 进而出现水分的进入导致混合料水损害的发生。

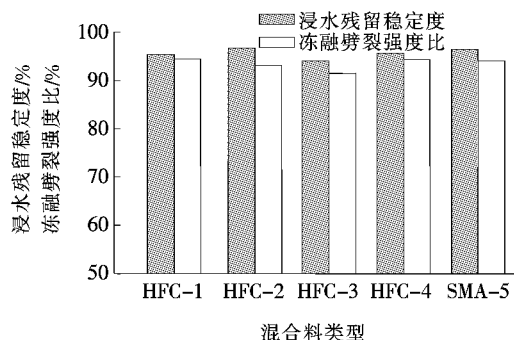


图5 水稳性能试验结果

### 3.3 抗磨耗性能

图6为飞散试验结果。图6表明这5种级配分散损失都达到了规范标准, 均满足路用性能要求。其中HFC-1、HFC-2以及HFC-3这3种沥青混合料的飞散损失逐渐降低, 分析其原因, 这3种混合料中HFC-3的 $n$ 最小故其油石比最小, 导致其沥青胶浆与集料的黏结能力最弱, 飞散损失也最多。而对于HFC-4和SMA-5, 其飞散损失小于前3种混合料, 这是因为相比前3种混合料, 其空隙率较小故不易碰撞导致剥落。

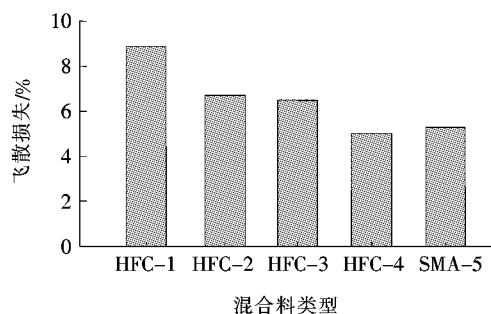


图6 抗磨耗性能试验结果

### 3.4 长期抗滑性能

采用环道式沥青加速磨耗仪, 累计磨耗30万次。试验初期磨耗5 000次便进行一次抗滑数据测量, 磨耗次数为1万~3万次时, 每1万次进行一次抗滑数据测量, 当磨耗次数为3万~15万次时, 每2万次进行一次抗滑数据测量, 当磨耗次数为15万~30万次时, 每5万次进行一次抗滑数据测量。磨耗30万次前后, 试件表面形貌对比如图7所示, 构造深度(MTD)和摆值(BPN)随磨耗次数的关系如图8、9所示。

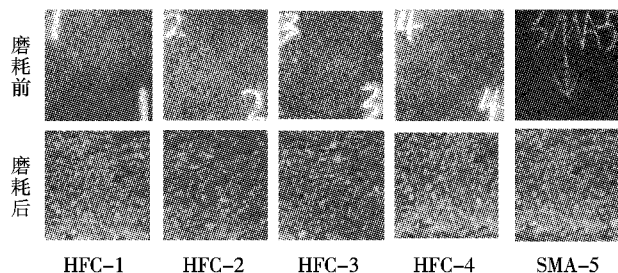


图7 5种混合料磨耗前后的表面形貌对比图

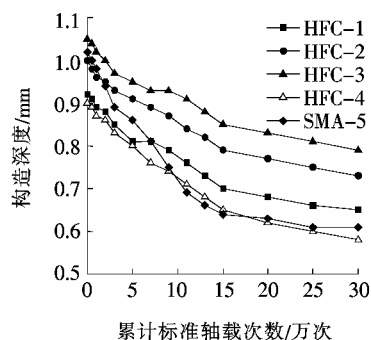


图8 构造深度随磨耗次数的衰变规律

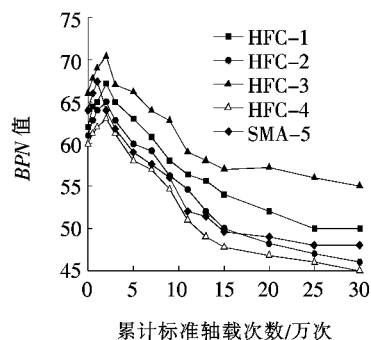


图9 摆值随磨耗次数的衰变规律

由图7可以看出: 磨耗前HFC-1、HFC-2和HFC-3这3种混合料的形貌表现为越来越粗糙, HFC-4的形貌则比较细致, 而SMA-5形貌表现为细致且分布均匀。选其混合料受车轮磨耗的中间区域进行分析。磨耗30万次后, 所有混合料内侧磨耗均比较严重, 分析其原因, 主要是内测轮胎转动时的切向力导致磨耗增加导致。

由图8可以看出: 5种混合料构造深度随标准荷载作用次数的变化规律一致, 表现为作用次数增加构造深度减小, 并且在作用次数达到15万次以前构造深度下降速度较快, 作用次数达到15万次以后构造深度基本趋于稳定。对比分析不同类型沥青混合料, 发现HFC类型的构造深下降速率远远低于SMA-5, 其原因主要是HFC的骨架性能不良导致其结构稳定性不

良,在试验过程中会发生压密现象。在所有试验混合料中,HFC-3因其骨架性能良好,其构造深度一直处于最优水平。

由图9可以看出:在轮载磨耗初期,BPN值并没有出现传统认为的下降,其表现出短暂的上升趋势,其原因是沥青膜在磨耗作用下经历了从厚到薄再到脱落的过程,沥青膜脱落后粗糙的集料表面出现使其与橡胶片接触面积增大,从而黏附力也变大导致BPN值上升。但磨耗次数持续增加,集料表面纹理会被磨光从而黏附力变小导致BPN值下降,直至稳定。BPN值降低速率的转折点同样出现在轴载作用15万次时,表现为轴载作用次数达到15万次以前BPN值变化速率较快,轴载作用次数达到15万次以后BPN值基本趋于稳定。进行对比分析可以发现,HFC-3的BPN值一直最大且降低速率最小,其原因是HFC-3结构比较稳定,在试验过程中不会因为被压密而导致BPN值出现大幅度降低。

## 4 结论

(1) 基于抗滑性能的改进型多点支撑薄层罩面技术,在级配设计中引入了7.1 mm筛孔对4.75~9.5 mm粒径进行进一步控制,采用压碎筛分试验确定粗细集料分界筛孔尺寸和细集料级配,同时依据此改进型级配设计方法设计了HFC-1、HFC-2、HFC-3和HFC-4共4种级配并确定了相应的油石比。

(2) 对混合料的高温性能、水稳性能以及抗磨耗性能进行了探究,结果表明HFC混合料高温抗车辙能力较好,水稳定性良好,抗磨耗能力也较强。

(3) 通过采用小型加速磨耗仪对5种级配的薄层罩面(HFC-1、HFC-2、HFC-3、HFC-4和SMA-5)进行抗滑衰减研究,结果显示随着轮载次数的增加,BPN值呈现出先短暂增大再快速变小最后趋于稳定的趋势;而其构造深度则随着轮载次数的增加不断减小,呈现出前期降低速率较快,后期基本稳定的趋势。

(4) 综合路用性能和表面功能,5种级配薄层罩面中HFC-3的综合性能最好。

## 参考文献:

[1] Son S, Alqadi I L, Zehr T. 4.75 mm SMA Performance and Cost—Effectiveness for Asphalt Thin Overlays[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2016, 17

(9):799—809.

- [2] Chen D H, Scullion T. Very Thin Overlays in Texas[J]. Construction & Building Materials, 2015, 95:108—116.
- [3] 宋阳. Novachip 超薄磨耗层在高速公路预防性养护中的应用研究[D]. 华南理工大学硕士学位论文, 2016.
- [4] Roa J A. Evaluation of International Friction Index and High—Friction Surfaces[Z], 2008.
- [5] 李东海. 基于搓揉试验的沥青路面抗滑性能研究[D]. 华南理工大学硕士学位论文, 2013.
- [6] Son S, Al—Qadi I L, Zehr T. 4.75 mm SMA Performance and Cost—Effectiveness for Asphalt Thin Overlays[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2016, 17 (9):799—809.
- [7] 邵立波. 基于使用功能的小粒径沥青混合料材料组成设计方法研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2011.
- [8] Smith, K. L, Titus—Glover, et al. Guide for Pavement Friction[J]. Nchrp Web Document, 2009.
- [9] Jeff S. Uhlmeier, Linda M. Pierce, Jim T. Weston. Nova-Chip[M]. Washington State Department of Transportation, 2003.
- [10] 左秋英. LASTIKA 薄层沥青罩面应用技术研究[D]. 长沙理工大学硕士学位论文, 2007.
- [11] 张争奇. 高速公路沥青路面维修养护技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [12] Warid M N M, Hainin M R, Yaacob H, et al. Thin Cold—Mix Stone Mastic Asphalt Pavement Overlay for Roads and Highways[J]. Materials Research Innovations, 2014, 18(S6):303—306.
- [13] 张毅, 安海超, 杨人凤, 等. 薄层罩面用温拌纤维沥青混合料性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2014(2).
- [14] Koohmishi M, Palassi M. Evaluation of Application of Thin HMA Overlay on the Existing Flexible Pavement for High—Traffic—Volume Rural Highways[J]. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2015, 59(1).
- [15] 吴平, 王选仓.  $\text{TiO}_2$  改性乳化沥青薄层罩面的净化性能[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2017(1).
- [16] 李蕊, 李彦伟, 石鑫, 等. 薄层罩面沥青混合料的设计方法及其路用性能研究[J]. 中外公路, 2012(4).
- [17] 张肖宁, 王绍怀, 吴旷怀, 等. 沥青混合料组成设计的CAVF法[J]. 公路, 2001(12).
- [18] 李小松. 用于薄层罩面的AC—10沥青混凝土级配组成及路用性能的研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2009.
- [19] 赵永利. 沥青混合料的结构组成机理研究[D]. 东南大学博士学位论文, 2005.
- [20] 刘长波. 基于抗滑性能的钢桥面铺装用环氧沥青混合料设计[D]. 东南大学硕士学位论文, 2015.