

# 小粒径排水沥青混合料路用性能及功能特性实验及效果

何苗苗, 朱祥勇, 廖宇, 张权

(成都建工路桥建设有限公司, 成都 610031)

**摘要:** 为探究小粒径排水沥青混合料应用于超薄沥青罩面养护中的可行性, 采用车辙试验、低温小梁弯曲试验、冻融劈裂试验、肯德堡飞散试验、渗透试验和摆式摩擦系数试验, 对4种沥青结合料、2种级配形式共计8种组合形式下的小粒径排水沥青混合料进行路用性能和功能特性试验研究, 同时与OGFC-13大粒径排水沥青混合料进行对比。结果表明: 采用PAC-5级配形式的小粒径排水沥青混合料其高低温性能、水稳定性、抗飞散性和排水性能均要优于OGFC-5的级配形式, 但高温性能与低温性能要次于OGFC-13混合料; 环氧沥青作为结合料时有助于提升混合料的各项路用性能, 但排水与抗滑等功能特性有所下降, 同时由于成本较高, 可采用SBS-SPT高黏改性沥青代替。综合各项性能试验结果和经济成本的考虑, 采用PAC-5级配、SBS改性沥青作为结合料同时参加II型高黏改性剂时, 小粒径排水沥青混合料的性能最佳, 有望推广应用至超薄沥青罩面养护中。

**关键词:** 小粒径; 沥青混合料; 排水; 路用性能; 功能特性

**中图分类号:** U416.217 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)09-0056-06

路面的表面特性直接影响行车的舒适性与安全性。为了改善沥青路面的功能特性, 沥青混合料往往需要综合摩擦性能、渗透性和轮胎/路面噪声等众多因素设计。近年来, 排水沥青混合料由于自身具有大空隙率和粗糙表面纹理的特征, 使得路面同时兼具排水、降噪、抗滑等功能特性, 很好地满足了车辆交通的行驶需求, 因此得到广泛应用和推广。在此背景下, 有不少专家学者针对其路用性能或功能特性进行了大量的研究工作。Chen等<sup>[1]</sup>、潘京军<sup>[2]</sup>、张佳<sup>[3]</sup>通过选取不同种类的沥青结合料, 研究其对OGFC-13排水沥青混合料路用性能的影响, 结果表明采用聚合物改性沥青要优于传统普通沥青, 而且提高结合料的60℃动力黏度, 有助于提升排水沥青混合料的马歇尔稳定度、高温稳定性和排水性能。张玉富<sup>[4]</sup>、黎晓等<sup>[5]</sup>分别对OGFC-10和OGFC-13排水沥青混合料的耐久性能和疲劳性能进行了试验研究, 发现消石灰作填料时耐久性能最佳, 而且随着沥青膜厚度的增加, 其耐久性能显著提高; 耗散能变化比曲线能够较为清晰地反映出材料在疲劳重复加载中的三阶段损伤过程, 并与材料

疲劳寿命具有良好的幂函数关系。

不难发现, 现有研究大部分都是针对OGFC-13或OGFC-10的排水沥青混合料, 而对于公称最大粒径为4.75 mm的小粒径排水沥青混合料的研究较少<sup>[6-10]</sup>。Luo等<sup>[11-12]</sup>提出采用环氧沥青作为小粒径排水沥青混合料用结合料, 其高温稳定性和抗飞散性能均要优于公称最大粒径为13.2 mm的排水沥青混合料, 但是环氧沥青的成本较高, 不适合大面积推广。

目前, 以Novachip为代表的超薄沥青罩面技术能够解决路面平整度差、表面抗滑安全性不足的缺陷, 同时大大节省了原材料消耗, 符合节能环保的要求, 使之广受欢迎, 但昂贵的施工成本和专门的施工配套设备却限制了其进一步推广应用<sup>[13-16]</sup>。结合超薄沥青罩面技术与小粒径排水沥青混合料的特点可以发现, 二者在改善交通行驶质量和延长路面使用寿命方面具有异曲同工之处, 因此若能将小粒径排水沥青混合料应用至超薄沥青罩面养护体系中, 将势必形成一种经济可行、性能优良的高速公路养护技术。

**收稿日期:** 2024-09-12

**作者简介:** 何苗苗(1993—), 女, 四川绵阳人, 硕士, 工程师, 研究方向为道路工程; 朱祥勇(1975—), 男, 四川达州人, 高级工程师, 研究方向为市政工程; 廖宇(1984—), 男, 四川成都人, 高级工程师, 研究方向为市政工程; 张权(1982—), 男, 湖北荆州人, 高级工程师, 研究方向为市政工程。

基于此,本文通过对4种沥青结合料和2种级配形式共计8种类型的小粒径排水沥青混合料的路用性能和功能特性进行试验研究,并与OGFC-13大粒径排水沥青混合料的性能进行对比,评价其在超薄罩面养护中应用的可行性。

## 1 试验准备

### 1.1 改性剂

试验用沥青高黏改性剂主要有I型、II型和III型3种,如图1所示。其中SBS改性沥青与3种高黏剂的掺配比例均为90:10。

### 1.2 沥青与集料

为对比不同结合料对小粒径排水沥青混合料产生的性能差异,选用3种SBS高黏改性沥青(SBS改性沥青分别与I、II和III改性,记为SBS-I、SBS-II和SBS-III)和热拌环氧沥青作为混合料成型时的结

合料,其技术指标见表1和表2。集料选用优质耐磨的玄武岩集料,填料选用石灰岩矿粉,其主要技术指标见表3。

### 1.3 配合比设计

试验中对小粒径排水沥青混合料采用了OGFC-5和PAC-5两种级配形式,包括作为对照组的OGFC-13在内的3种级配见表4,不同级配对应的最佳油石比也列于表4中,最佳油石比根据析漏试验与飞散试验确定。

### 1.4 沥青混合料制备

将粗、细集料和矿粉提前放入190℃烘箱中充分加热5h左右;沥青加热至170℃左右;拌合锅设定温度为190℃,提前预热0.5h。拌合时,先将高黏度改性剂和热集料干拌90s,以使改性剂均匀分散在矿料中;然后将沥青按照预定用量加入,拌和90s;

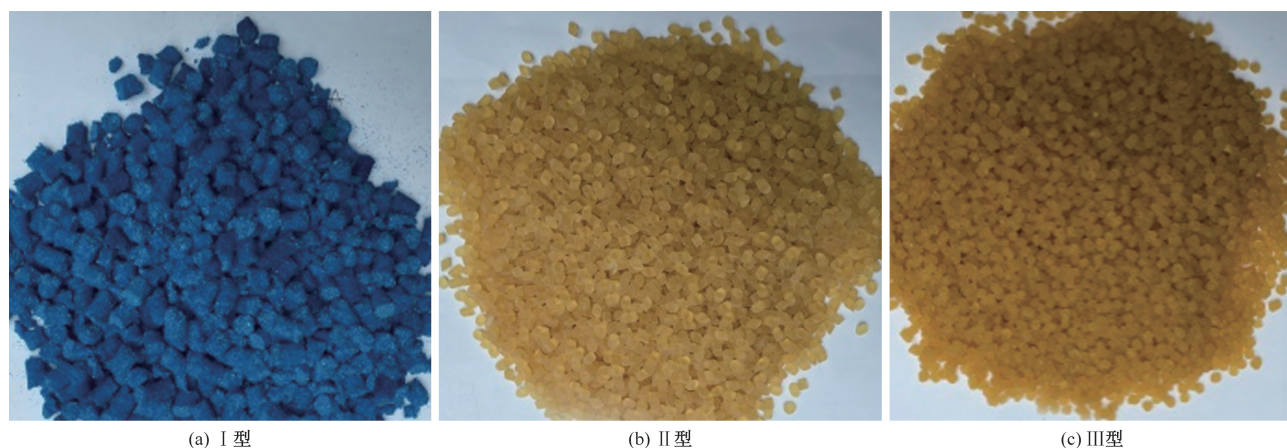


图1 3种高黏性剂

表1 3种SBS高黏改性沥青技术指标

技术指标	试验结果			技术要求	试验方法
	SBS-I	SBS-II	SBS-III		
25℃针入度/0.1mm	56.1	54.7	56.8	≥40	ASTM D 5
5℃延度/5cm	35.4	39.2	36.8	≥30	ASTM D 113
软化点/℃	95.5	95.8	94.6	≥90	ASTM D 36
闪点/℃	286	280	293	≥230	ASTM D 92
溶解度/%	99.3	99.2	99.3	≥99	ASTM D 2042
170℃旋转黏度/Pa·s	2.528	2.461	2.497	≤3	ASTM D 4402
25℃弹性恢复/%	98.0	98.5	97.6	≥95	ASTM D 6084
RTFOT 后残留物	质量损失/%	-0.08	-0.04	≤±1.0	ASTM D 2872
	25℃针入度比/%	71	76	≥65	ASTM D 5
	5℃延度/cm	25.4	28.6	≥20	ASTM D 113

表2 热拌环氧沥青技术指标

技术指标	试验结果	技术要求	试验方法
23℃的比重	1.03	1.00~1.05	ASTM D 1475
针入度/0.1mm	13	5~20	ASTM D 5
软化点/℃	≥100	≥100	ASTM D 36
23℃的抗拉强度/MPa	2.6	≥1.5	ASTM D 638
23℃的断裂延伸率/%	226	≥100	ASTM D 638

表3 矿料主要技术指标

技术指标	试验结果	技术要求	试验方法
洛杉矶磨耗值(C级)/%	11.6	≤28	ASTM C 535
压碎值/%	10.2	≤26	ASTM D 3744
表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	3#(4.75~9.5mm)	2.977	≥2.6 ASTM C 127
	4#(1.18~4.75mm)	2.747	
矿粉表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.709	≥2.50	ASTM C 127

表 4 试验级配及对应的最佳油石比

级配形式	不同筛孔尺寸下的通过率/%										最佳油石比/%	空隙率/%
	16 mm	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm		
OGFC-5	100.0	100.0	100.0	90.6	18.0	9.3	9.2	8.2	7.4	6.3	5.0	20
PAC-5	100.0	100.0	100.0	33.3	9.7	7.7	7.7	7.3	6.6	5.6	5.0	20
OGFC-13	100.0	97.4	69.8	21.1	14.6	11.7	9.7	7.8	6.4	5.0	4.5	20

最后加入矿粉,拌和 90 s,完成沥青混合料的制备。

## 2 结果分析

对上述 3 种级配形式和 4 种沥青结合料组合而成的 12 种排水沥青混合料进行室内试验,试验结果均为 3 次平行试验得到的平均值。

### 2.1 路用性能

#### 2.1.1 高温稳定性

图 2 为 60 °C 车辙试验结果,采用动稳定度指标来表征排水沥青混合料的高温稳定性能。从图 2 中可以看出,对于任一相同级配形式的沥青混合料,采用环氧沥青作结合料时其动稳定度要远大于其余 3 种高黏改性沥青作结合料的情况,说明环氧沥青可有效改善排水沥青混合料的高温稳定性。进一步观察发现,在 3 种 SBS 高黏改性沥青中,无论采用哪种级配形式,SBS-II 的高温稳定性均要优于其他 2 种。而对于相同结合料的情况,采用 PAC-5 和 OGFC-13 的级配形式,其动稳定度相比 OGFC-5 均有大幅度提升,这是由于 PAC-5 和 OGFC-13 中粗集料较多,混合料内部形成稳定的骨架-空隙结构,增强了其抵抗车辙变形的能力。

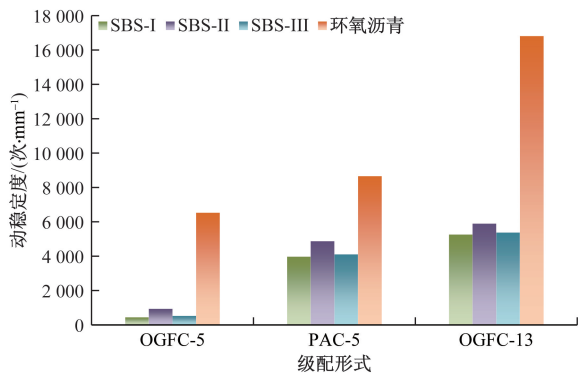


图 2 车辙试验结果

#### 2.1.2 低温抗裂性

图 3 为小梁低温弯曲试验结果,采用抗弯拉强度来表征排水沥青混合料的低温抗裂性能。从图 3 中可以看出,采用环氧沥青作结合料和提高排水沥青混合料的公称最大粒径均可有效提升混合料的低温稳定性能。而且对于公称最大粒径为 4.75 mm 的小粒径排水沥青混合料,PAC-5 级配形式的抗弯

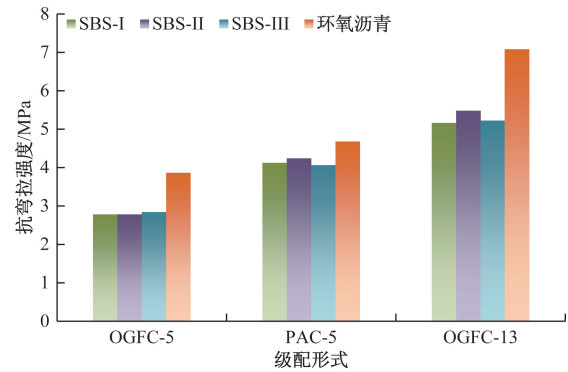


图 3 小梁低温弯曲试验结果

拉强度要远大于 OGFC-5 的级配形式,其强度保持在 4 MPa 左右,具有优异的低温抗开裂能力。

#### 2.1.3 水稳定性

图 4 为冻融劈裂试验结果,采用劈裂试验强度比来表征排水沥青混合料的抗水损害能力。从图 4 中可以看出,采用 PAC-5 级配形式的水稳定性能要优于 OGFC-5 的级配形式,采用环氧沥青作结合料时其性能要优于其他 3 种 SBS 高黏改性沥青,采用 II 型高黏改性剂时其性能略优于其他 2 种高黏改性剂。在这 3 个影响因素中,级配形式对水稳定性能的贡献程度最大,说明选择合理恰当的级配形式有助于提升沥青胶浆与集料之间的黏结能力,从而增强其在雨水作用下的抗剥落性能。

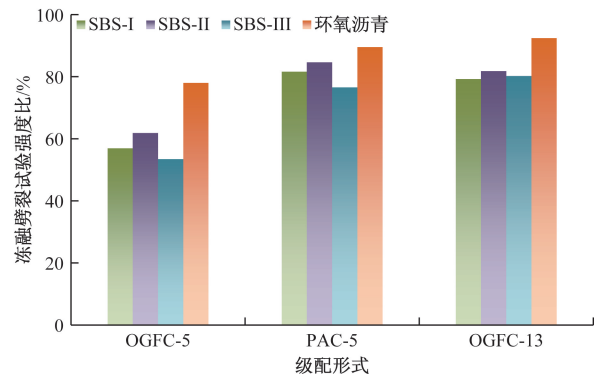


图 4 冻融劈裂试验结果

#### 2.1.4 抗飞散性

图 5 为飞散试验结果,采用飞散损失率来表征排水沥青混合料的抗飞散性能。从图 5 中可以

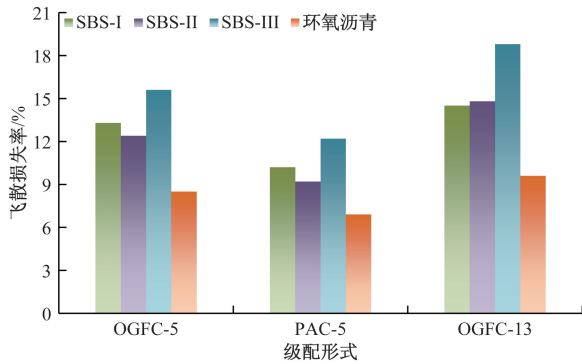


图 5 飞散试验结果

看出,采用 PAC-5 级配形式的混合料,其飞散损失率明显低于同等条件下的 OGFC-5 的级配形式,说明在该种级配形式下高黏沥青能够更加充分、均匀地裹覆在集料表面,增强沥青、集料与矿粉三者之间的整体性。另外还可以注意到,当沥青结合料一定时,采用 PAC-5 的级配形式其飞散损失率要同样低于 OGFC-13 的级配形式,说明当最大公称粒径较小时,更有利于增强沥青与集料之间的黏结性能。由于环氧沥青的黏度较大,因此在提高混合料抗飞散性能方面相比 3 种 SBS 高黏改性沥青更有优势,但提升幅度低于通过改变级配形式的措施。

## 2.2 功能特性

### 2.2.1 排水性能

图 6 为渗透试验结果,采用透水系数来表征排水沥青混合料的排水性能。从图 6 中可以看出,无论是哪种级配形式,采用 3 种 SBS 高黏改性沥青作结合料时其渗透系数均大于环氧沥青作结合料的情况,其原因在于环氧沥青的黏度更大,较 SBS 改性沥青更易黏附并包裹集料,填充于混合料间隙内,因此在提高混合料抗飞散性和水稳定性的同时其排水性能也不可避免地有所下降。

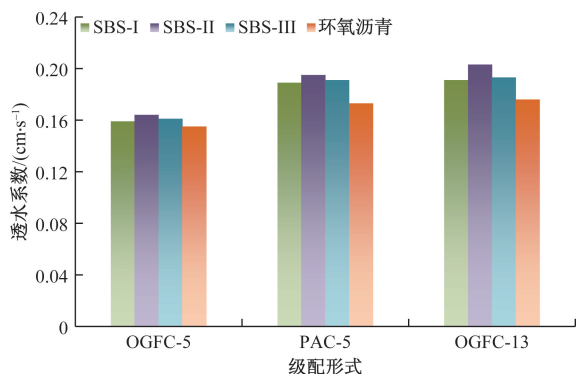


图 6 渗透试验结果

另外,尽管 3 种级配形式的空隙率均为 20%,但采用 PAC-5 和 OGFC-13 级配形式的沥青混合料其排水性能要优于 OGFC-5 的级配形式,这主要是因为 PAC-5 和 OGFC-13 的级配中粗集料更多,混合料内部形成的连通空隙率较大,因此渗透系数也就更大。

在 3 种高黏改性剂中 II 型的排水效果最好,III 型次之,I 型相对最小,但三者的差别保持在 0.02 以内,因此改性剂类型不足以成为影响排水性能的关键因素。

### 2.2.2 抗滑性能

图 7 为摆式摩擦试验结果,采用 BPN 值(摆锤摩擦系数)来表征排水沥青混合料的抗滑性能。从图 7 中可以看出,相比 OGFC-13 的大粒径排水沥青混合料而言,8 组不同类型的小粒径排水沥青混合料的抗滑性能更优,其 BPN 值均保持在 60 以上,远大于规范中不低于 45 的要求,这是因为小粒径排水沥青混合料具有丰富的表面粗糙纹理,能够在车辆低速行驶中提供足够的抗滑力。而且进一步观察还可以看出,无论采用哪种级配形式,环氧沥青作结合料时其 BPN 值均要小于 SBS 高黏改性沥青作结合料的情况。

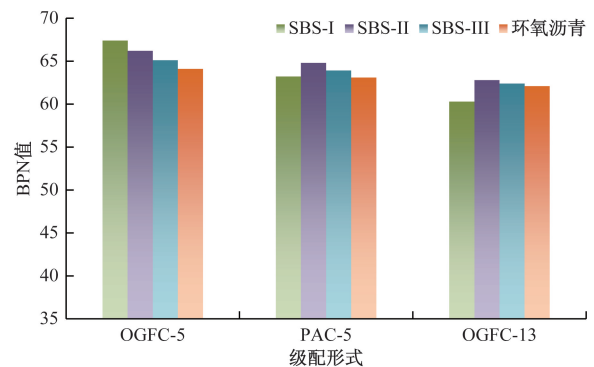
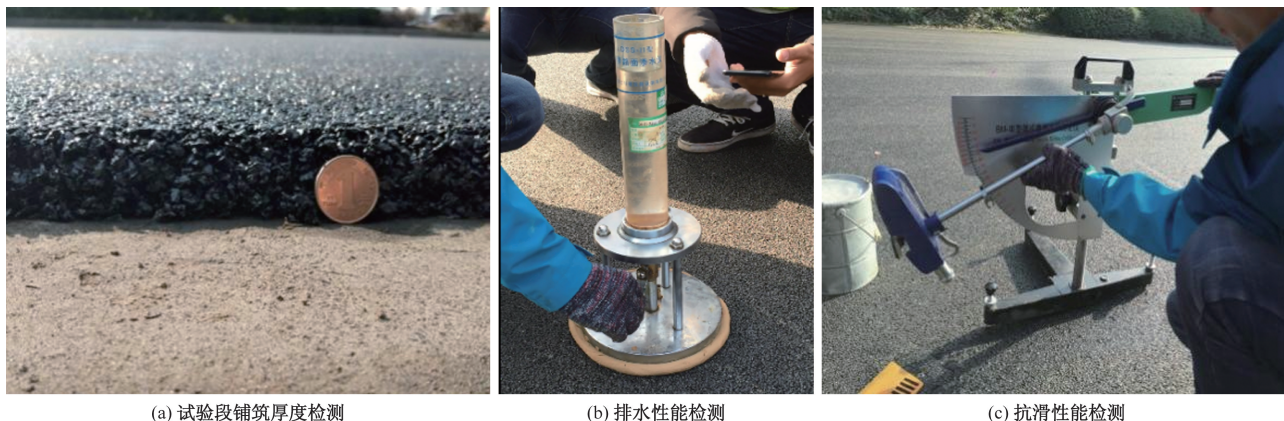


图 7 摆式摩擦试验结果

## 3 试验段铺筑

为检验小粒径排水沥青混合料在室外实体工程中的应用效果,依托成都市某干线公路大中修养护工程,在现场进行了试验段的铺筑,其中沥青结合料采用 SBS 沥青:II 型改性剂=90:10 的高黏改性沥青,级配形式为 PAC-5,如图 8(a)所示。试验段铺筑后第二天采用渗透试验和摆式摩擦系数试验进行了排水和抗滑性能的检测工作,如图 8(b)和图 8(c)所示。检测结果表明,小粒径排水沥青路面的整体厚度较薄,具备超薄罩面的使用需求。同



(a) 试验段铺筑厚度检测

(b) 排水性能检测

(c) 抗滑性能检测

图 8 试验段现场检测

时,渗透试验测试得到的透水系数平均值为  $0.19 \text{ cm/s}$ ,最小值为  $0.15 \text{ cm/s}$ ,表明小粒径排水沥青混合料具有优异的排水性能,可达到小雨、中雨情况下路表面不出现径流的要求<sup>[17]</sup>。摆式摩擦系数试验测试得到的 BPN 平均值为 62,表明混合料表面具有丰富的细观纹理,从而在车辆低速行驶过程中增加了轮胎与路面之间的附着力,提高了车辆行驶安全性。

#### 4 结论

(1)采用 PAC-5 级配形式的小粒径排水沥青混合料,其高温性能、低温性能、水稳定性、抗飞散性和排水性能均要优于同等条件下的 OGFC-5 级配形式。与 OGFC-13 相比,其高温性能和低温性能方面略有不足,但依旧满足试验规范要求。

(2)环氧沥青作结合料时能有效改善排水沥青混合料的各项路用性能,但排水与抗滑等功能特性有所下降,同时由于其成本较高,因此可以采用 SBS-II 型高黏改性沥青作为替代,结合 PAC-5 的级配形式,同样具有较为优异的使用性能。

(3)室外实体工程应用表明,将小粒径排水沥青混合料应用至超薄沥青罩面养护技术中是可行的,其透水系数与 BPN 值分别可以达到  $0.19 \text{ cm/s}$  和 62,表现出较为优异的功能特性。

#### 参考文献

- [1] CHEN J S, LEE C, LIN Y Y. Influence of engineering properties of porous asphalt concrete on long-term performance [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(4): 1-7.
- [2] 潘京军. OGFC-13 排水沥青路面性能及应用研究[J]. *工程建设与设计*, 2023(18): 169-171.
- [3] 张佳. 直投式高黏改性剂的制备及其在排水沥青混合料中的应用[D]. 西安: 长安大学, 2023.
- [4] 张玉富. 排水沥青混合料耐久性能研究[J]. *城市道桥与防洪*, 2017(5): 276-278.
- [5] 黎晓, 梁乃兴, 白洪涛, 等. 排水沥青混合料疲劳损伤耗散能变化比[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2017, 37(4): 98-104.
- [6] ANDRES VA, VALERIO C, RODRIGUEZ T, et al. Exploratory study of porous asphalt mixtures with additions of reclaimed tetra pak material[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 160: 233-239.
- [7] WANG X W, GU X Y, DONG Q, et al. Evaluation of permanent deformation of multilayer porous asphalt courses using an advanced multiply-repeated load test [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 160: 19-29.
- [8] ZHANG H J, LI H, ZHANG Y, et al. Performance enhancement of porous asphalt pavement using red mud as alternative filler[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 160: 707-713.
- [9] 马翔, 倪富健, 陈荣生, 等. 排水性沥青混合料低温性能评价[J]. *公路交通科技*, 2009, 26(6): 8-12.
- [10] 徐健, 陈先华, 施向东. 基于主结构形成准则的细粒式排水沥青混合料级配优化[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(12): 5260-5266.
- [11] LUO S, LU Q, QIAN Z D. Performance evaluation of epoxy modified open-graded porous asphalt concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 76: 97-102.
- [12] LUO S, QIAN Z D, XUE Y C. Performance evaluation of open-graded epoxy asphalt concrete with two nominal maximum aggregate sizes [J]. *Journal of Central South University*, 2015, 22(11): 4483-4489.
- [13] SURESHA S N, SATISH D. Interface bond strength of ultra-thin whiteopping (UTW) and hot mix asphalt (HMA) composites by direct shear [J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2017, 45(6): 1999-2008.
- [14] 殷俊, 张愈恒, 刘子铭, 等. 小粒径排水型抗滑超薄磨耗层施工技术[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(9): 219-227.
- [15] 徐健, 陈先华, 施向东. 基于主结构形成准则的细粒式排水沥青混合料级配优化[J]. *科学技术与工程*, 2023,

23(12): 5260-5266.

9597.

[16] 赵丽华,白子玉,许斌,等. 排水沥青路面表面强化技术对比[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(22): 9591-

[17] 魏小皓. 小粒径排水抗滑型超薄沥青罩面技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.

## Experiments and Effects on Road Performance and Functional Characteristics of Drainage Asphalt Pavement with Small Particle Sized Aggregate

HE Miaomiao, ZHU Xiangyong, LIAO Yu, ZHANG Quan

(Chengdu Construction Engineering Road and Bridge Construction Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In order to evaluate the feasibility of the application of drainage asphalt mixture with small particle sized aggregate in the maintenance of ultra-thin asphalt overlay, the rutting test, low-temperature bending test, freeze-thaw split test, Cantabro dispersion test, permeability test and pendulum friction coefficient test were conducted to evaluate the pavement performance and functional property of 8 drainage asphalt pavement composed of 4 kinds of asphalt binder and 2 gradation forms. And it was compared with large particle sized aggregate drainage asphalt mixture (OGFC-13). The results show that the asphalt mixture with PAC-5 gradation is better than OGFC-5 gradation in the form of high and low temperature performance, water stability, skid resistance and drainage performance. But the low temperature performance and water stability is inferior to OGFC-13 mixture. Epoxy asphalt binder is conducive to improve the overall pavement performance of drainage asphalt pavement, however, the functional properties such as drainage and anti-sliding have declined. Meanwhile, due to the expensive cost, SBS-SPT modified asphalt can be used as a substitute. Therefore, considering the results of various performance tests and economic costs, when using PAC-5 gradation, SBS modified asphalt and II modifier, the performance of drainage asphalt mixture with small particle sized aggregate is the best, which is expected to be widely applied to the maintenance of ultra-thin asphalt overlay.

**Keywords:** small particle sized aggregate; asphalt mixture; drainage; pavement performance; functional property