

文章编号:1672-9331(2021)04-0009-07

超黏精薄层罩面沥青混合料性能研究

孔令绅¹, 李雪萍², 冯志强³

(1. 河南中州路桥建设有限公司, 河南 周口 466000; 2. 河南省化工研究所有限责任公司, 河南 郑州 450052;
3. 河南交通职业技术学院, 河南 郑州 450046)

摘要: 为解决传统薄层罩面水稳定性差、易开裂等性能方面的问题, 提高薄层罩面的使用寿命及服务水平, 在传统薄层罩面技术的基础上进行改进, 研发出一种超黏精的罩面结构类型。对超黏精罩面所用的超黏稠沥青、NovaBinder、高黏沥青 M 进行试验, 结果显示: 超黏稠沥青的整体性能优于另外两种高黏沥青。在 AC 密级配、OGFC 开级配基础上进行半开级配的超黏精罩面矿料级配设计, 然后对超黏精罩面、市场上某超薄磨耗层及 NovaChip B 进行高温抗车辙、低温抗开裂、抗水损害、飞散、析漏、抗滑及排水性能试验研究, 结果显示: 在不同试验温度下, 超黏精罩面的高温抗车辙能力均最优, 同时超黏精罩面较另外两种薄层罩面表现出更好的低温抗开裂、抗水损害、抗荷载冲击及施工和易性等性能, 且超黏精罩面的抗滑及排水性能也满足要求。

关键词: 超黏精罩面; 超黏稠沥青; 矿料级配; 油石比; 路用性能

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

Study on performance of super viscous fine thin-layer overlay asphalt mixture

KONG Ling-shen¹, LI Xue-ping², FENG Zhi-qiang³

(1. Henan Zhongzhou Road and Bridge Construction Co., Ltd., Zhoukou 466000, China; 2. Henan Chemical Industry Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450052, China; 3. Henan College of Transportation, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: In order to solve the performance problem of traditional thin-layer overlay such as the poor water stability and easy cracking, and improve the service life and service level of thin-layer overlay, the traditional thin-layer overlay technology was improved, and a super viscous fine overlay structure was developed. The test results of the super viscous tough asphalt, NovaBinder and high viscous asphalt M used in the super viscous fine overlay show that the overall performance of super viscous tough asphalt is better than the other two kinds of high viscous asphalt. On the basis of AC dense gradation and OGFC open gradation, the semi open gradation of super viscous fine overlay was designed. Then the performance of high-temperature rutting resistance, low temperature cracking resistance, water damage resistance, dispersion, leakage, sliding resistance and drainage of super viscous fine overlay, a super thin wearing course in the market and NovaChip B were studied experimentally. The results show that the performance of the high-temperature rutting resistance of super viscous fine overlay is the best at different test temperatures. At the same time, compared with the other two kinds of thin-layer overlays, the super viscous fine overlay has bet-

收稿日期: 2021-06-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51708513); 河南省重点科技攻关计划项目(152102210033)

通讯作者: 孔令绅(1979—), 男, 高级工程师, 主要从事公路与桥梁施工方面的研究。E-mail: 1182255799@qq.com

ter performance of low-temperature cracking resistance, water damage resistance, load impact resistance and construction workability, and it's performance of sliding resistance and drainage also meets the requirements.

Key words: super viscous fine overlay; super viscous tough asphalt; aggregate gradation; oil-stone ratio; pavement performance

随着经济的快速发展,我国交通基础设施逐步趋于完善。截至2020年底,我国公路总里程已超过510万km,比2019年新增约8.75万km,公路网密度达到了5 313 km/km²。国家“十四五”规划纲要提出了以绿色发展为导向的资源环境体系改革^[1]。随着公路网的建成,同时为了满足基础设施建设的现实需求,我国公路建设的理念已逐渐从追求大规模、高产出生转向追求高质量、优品质和长寿命。随着交通量的快速增长以及超载、过载车辆的增加,早期建成的公路远未达到设计使用年限就已出现车辙、松散、龟裂以及坑槽等病害,后期养护成本远超早期预算^[2]。完善传统养护工艺,延长路面使用寿命,提高公路服务水平,减少大修工程的出现,节约成本,提高资源利用率已成为目前道路工作者研究的主要方向^[3]。近年来,薄层罩面、微表处、雾封层等措施在养护工程上被广泛应用,且施工工艺逐渐得以完善^[4-6]。传统薄层罩面技术存在水稳定性差、易松散、易开裂等性能方面的不足,导致薄层罩面尚未达到设计使用年限就出现了严重的病害,影响了薄层罩面的使用寿命及服务水平。波兰采用SMA0/8, MNU0/6, MNU0/10在弗罗茨瓦夫市铺筑了多条试验路段,并对路面性能的变化进行了4年跟踪监测,结果表明不同结构类型、不同厚度的沥青薄层罩面均表现出良好的路用性能^[7]。虞将苗等^[8]研究发现在港珠澳大桥人工岛养护工程中在铣刨面上撒布SBS改性乳化沥青,并重铺高韧沥青超薄磨耗层可以有效降低胎噪,提高路面抗滑能力,延长路面使用年限,改善路面服务水平。梁娟^[9]将水性环氧乳液及固化剂应用到薄层罩面中,并采用正交试验法确定两者的最佳掺配比例,最后系统地评价了水性环氧乳化沥青混合料对薄层罩面路用性能的改善效果。超黏精罩面粗骨料最大公称粒径为9.5 mm,结构层设计厚度为20~25 mm,本研究在AC密级配、OGFC开级配的基础上进行半开级配超黏精罩面的配合比设计,通

过调整级配上下限来优化混合料的矿料级配,并选用超黏韧沥青来改善混合料的黏韧性。通过室内试验,对超黏精罩面所用的超黏韧沥青、Nova-Binder、高黏沥青M进行了比较分析,同时对比分析了超黏精罩面、市场上某超薄磨耗层及Nova-Chip B 3种薄层罩面的高温抗车辙、低温抗开裂、抗水损害、飞散、析漏、抗滑及排水等路用性能,为超黏精罩面技术在养护工程中的应用提供理论基础。

1 原材料及配合比设计

1.1 高黏沥青

在现有的薄层罩面技术中,摊铺厚度多为10~25 mm,混合料公称最大粒径多为9.5 mm,为保证路面有足够的构造深度,满足抗滑性能要求,设计空隙率往往大于10%。较大的空隙率会导致沥青胶浆在外界荷载、雨水冲刷以及紫外线等的综合作用下极易从骨料之间脱落,严重影响薄层罩面的路用性能及使用年限。沥青对薄层罩面的性能起着决定性的作用,必须具有较好的模量及黏结能力,才能保证路面结构的耐久性。高黏高弹沥青能够有效弥补常规道路石油沥青及SBS类改性沥青的不足。本研究对复合超黏韧改性沥青、NovaBinder、高黏沥青M 3种高黏沥青展开研究。参照美国SHRP计划的要求,选用流变仪对这3种沥青进行温度扫描试验,确保PG等级均满足要求。3种高黏沥青主要技术指标的试验结果见表1。

从表1可以看出:3种高黏沥青均具有良好的性能;从延度、储存稳定性、弹性恢复率等方面考虑,超黏韧沥青性能最好;高黏沥青M表现出更好的高温性能;从135℃布式旋转黏度考虑,高黏沥青M相对最好,可以更好地控制混合料的摊铺碾压温度;3种高黏沥青60℃动力黏度的试验结果均大于200 000 Pa·s,能够满足重交通荷载的要求;3种高黏沥青的PG等级均满足我国道

表 1 高黏沥青主要技术指标的试验结果

Table 1 Test results of main technical indexes of high viscous asphalt

检测项目	技术要求	试验结果		
		超黏韧沥青	NovaBinder	高黏沥青 M
针入度(25 ℃)/(0.1 mm)	—	54.6	58.4	46.8
软化点/℃	—	92.0	88.5	96.5
延度(5 cm/min,5 ℃)/cm	—	47	32	40
储存稳定性(软化点之差)/℃	≤2.5	1.1	1.9	1.2
弹性恢复率(25 ℃)/%	—	98.7	93.1	89.6
动力黏度(60 ℃)/(Pa·s)	—	428 600	231 800	528 400
135 ℃布式旋转黏度/(Pa·s)	≤3	1.63	2.37	1.34
PG 等级/℃	—	115	89	115

路行业普遍认可的夏季路表最高温度 88 ℃的要求,其中超黏韧沥青及高黏沥青 M 甚至达到了 115 ℃。考虑到我国极炎热地区沥青路面的夏季路表温度可能会超过 88 ℃的极端温度,因此超黏韧沥青综合起来更具优势。

1.2 配合比设计

AC 密级配薄层罩面因其较好的密实性和稳定性而被广泛应用,但其构造深度不足,抗滑性能较差,严重影响车辆的制动能力;OGFC 属于开级配结构类型,具有较好的排水、抗滑及降噪性能,但其空隙率较大,沥青胶浆易从骨料间脱落,因而抗水损害及抗车辆轴载的冲击能力较差,影响沥青路面的使用寿命。鉴于超黏精罩面结构类型的特点,综合考虑其路用性能及使用寿命,在前人研

究及室内试验的基础上,本研究选用性能均衡的半开级配进行超黏精罩面的设计,提高了 0.075, 0.15,0.3,0.6,1.18,2.36 mm 筛孔的通过百分率,降低了 4.75,9.5 mm 筛孔的通过百分率。此结构类型虽没有上述两种级配类型的突出优点,但综合性能较均衡,能够满足高等级薄层罩面的性能要求。本研究的粗集料为粒径 5~10,3~5 mm 的玄武岩碎石,细集料为粒径 0~3 mm 的石灰岩机制砂,矿粉由石灰岩磨细而成。粗、细集料及矿粉的相关技术指标均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)的要求。超黏精罩面矿料级配的设计结果见表 2。对超黏精罩面、NovaChip B 罩面及国内成功应用的某超薄磨耗层进行马歇尔试验,结果见表 3。

表 2 超黏精罩面矿料级配设计结果

Table 2 Design results of aggregate gradation of super viscous fine overlay %

项目	通过下列筛孔(mm)的质量百分率								
	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
上限	100.0	100.0	50.0	30.0	22.0	16.0	12.0	10.0	7.0
下限	100.0	80.0	30.0	23.0	12.0	8.0	6.0	5.0	4.0
目标级配	100.0	91.6	40.8	25.1	16.3	13.7	9.5	8.2	6.4

表 3 3 种沥青薄层罩面混合料马歇尔试验结果

Table 3 Marshall test results of three asphalt thin-layer overlay mixtures

混合料类型	最佳油石比/%	毛体积相对密度	空隙率/%	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%	稳定度/kN	流值/mm
某超薄磨耗层	6.1	2.388	18.9	28.6	43.1	6.34	4.2
超黏精罩面	5.4	2.433	13.1	22.9	46.8	8.94	3.2
NovaChip B	4.9	2.441	14.8	21.6	44.7	7.64	3.8

2 路用性能

与水泥混凝土路面不同的是,沥青路面在施工的全过程中矿料与沥青在高温及荷载作用下只发生了排列重组,而非发生了化学反应。薄层罩面属于柔性结构层,其路用性能在施工及运营期易受温度、车辆轴载、雨水及紫外线等外界环境的影响。本研究结合气候特点、道路服务能力及薄层罩面技术要求,对超黏精罩面、NovaChip B罩面及某超薄磨耗层进行高温抗车辙、低温抗开裂、抗水损害、析漏、飞散、抗滑及排水等路用性能的研究。

2.1 高温稳定性

沥青是一种黏弹性材料,对温度较为敏感,温度较高时易发生塑性变形,温度较低时会变得硬而脆。高温环境下沥青路面在车辆轴载,尤其是重轴载的作用下会发生塑性变形而产生车辙、拥包、泛油等病害,这些病害的形成是沥青路面高温抗车辙能力差的主要表现。改善沥青路面高温性能的方法主要有两种:一是在混合料中加入抗车辙剂、高黏剂等改善高温性能的外加剂;二是优化混合料矿料级配,增强矿料间的嵌挤能力^[10-11]。本研究从选用超黏韧沥青及改善级配类型两个方面进行超黏精罩面的设计,在保障空隙率的前提下提高骨料间的嵌挤能力。本研究通过 60, 70 °C 车辙试验来评价 3 种薄层罩面的高温抗车辙能力,结果见图 1~2。

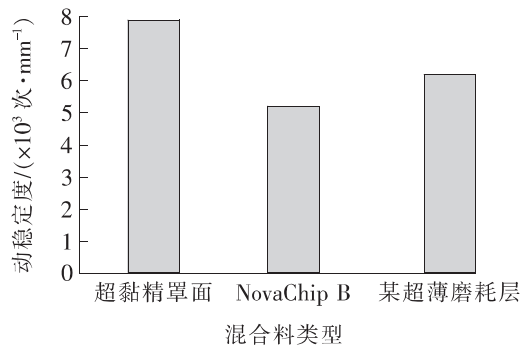


图 1 60 °C 动稳定度试验结果

Fig. 1 Test results of dynamic stability at 60 °C

从图 1~2 可以看出:在试验温度相同时,超黏精罩面动稳定度的试验结果均最大,NovaChip B罩面的最小;当试验温度从 60 °C 升高到 70 °C 时,3种薄层罩面动稳定度的试验结果均显著降

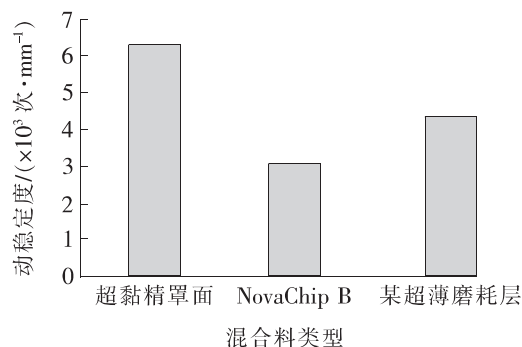


图 2 70 °C 动稳定度试验结果

Fig. 2 Test results of dynamic stability at 70 °C

低,超黏精罩面降低幅度最小,降幅为 19.1%, NovaChip B罩面降低幅度最大,降幅为 40.8%。这说明超黏精罩面的高温抗车辙能力优于另外两种薄层罩面,其主要原因有两个,一是超黏精罩面使用的超黏韧沥青具有更高的模量,这使得混合料在高温环境下抵抗轴载塑性变形的能力更强;二是超黏精罩面矿料级配的合理优化使骨料的嵌挤能力更强,混合料更加密实。

2.2 低温抗裂性

地处季节性冰冻地区的沥青路面在冬春季节交替时极易出现裂缝病害,这主要是因为沥青的性能受温度的影响较大。沥青在低温环境下会变得硬而脆,当结构层内部的允许拉应力小于温缩应力时就会开裂,这类裂缝的出现是沥青路面低温抗裂性能差的主要表现形式^[12-15]。本研究通过 -10 °C 小梁弯曲试验来评价 3 种薄层罩面的低温抗开裂性能,弯曲破坏应变的试验结果见图 3。

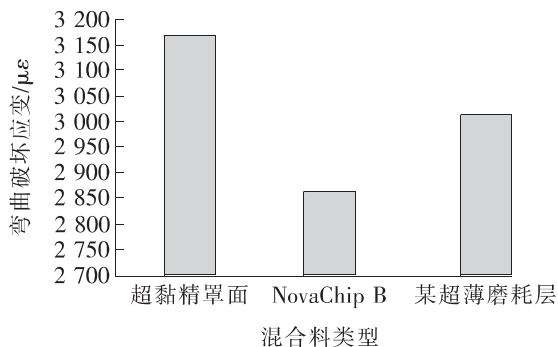


图 3 弯曲破坏应变试验结果

Fig. 3 Test results of bending failure strain

从图 3 可以看出:3种薄层罩面的弯曲破坏应变均满足不低于 2 500 的要求,表明这 3 种薄层罩面均具有较好的低温性能。其中,超黏精罩面的弯曲破坏应变最大,达到了 3 167 $\mu\epsilon$,这与超黏韧沥青具有较好的低温延度相吻合,同时级配优化

后的超黏精罩面更加密实,结构整体性更好,小梁试件抵抗低温开裂的能力更强。

2.3 水稳定性

雨水渗透已成为沥青路面破坏的重要因素。在南方多雨地区,雨季过后沥青路面均会受到不同程度的损害,这大大增加了沥青路面的养护成本。雨水在自重及车辆轴载的作用下沿着路面空隙向下渗透,沥青与矿料之间的黏附性受其影响逐渐降低,最终导致沥青胶浆从空隙中剥落。而松散、坑槽等是沥青路面抗水损害能力差的主要表现形式^[16-19]。本研究通过浸水马歇尔试验及冻融劈裂试验来评价 3 种薄层罩面的水稳定性,结果见图 4~5。

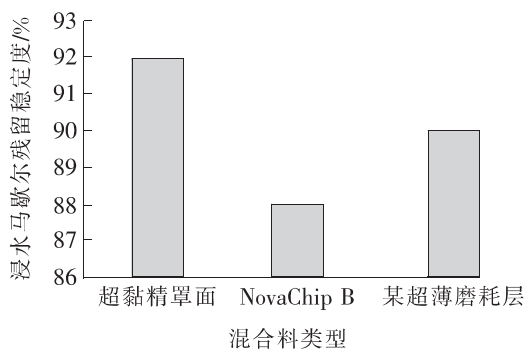


图 4 浸水马歇尔试验结果

Fig. 4 Results of immersion Marshall test

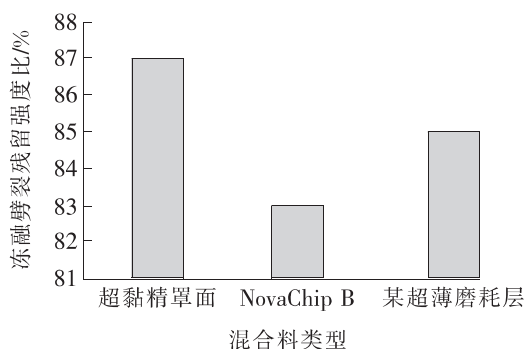


图 5 冻融劈裂试验结果

Fig. 5 Results of freeze-thaw splitting test

从图 4~5 可以看出:3 种薄层罩面浸水马歇尔残留稳定度及冻融劈裂残留强度比均满足不低于 85% 和 80% 的要求。其中,超黏精罩面的这两项试验结果均最大,分别为 92%,87%,这是因为超黏精罩面在空隙率最小的情况下还具有较大的油石比,矿料之间的沥青膜更厚,且超黏韧沥青具有更好的黏韧性,致使马歇尔试件的结构更加密实、稳固,混合料内部不易受到水的侵蚀,因而混合料的抗水损害能力更强。

2.4 飞散及析漏试验

薄层罩面结构类型骨料的最大公称粒径不超过 9.5 mm。为保证沥青路面有足够的抗滑性能,其设计空隙率往往较大,表层混合料受车辆轮胎揉搓而剥落的风险也较大,因此通过飞散试验来评价薄层罩面的抗荷载冲击能力尤为重要。自由沥青含量对混合料的生产、运输、摊铺过程至关重要,过大的油石比会影响沥青路面的施工和易性,同时,在运营过程中沥青路面易出现泛油、车辙等病害。本研究通过飞散试验及析漏试验来评价 3 种薄层罩面抵抗荷载冲击破坏的能力及施工和易性,结果见图 6~7。

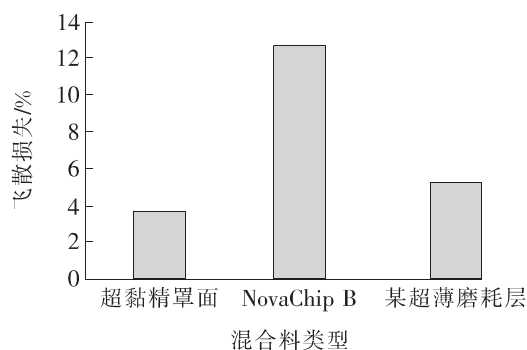


图 6 飞散试验结果

Fig. 6 Dispersion test results

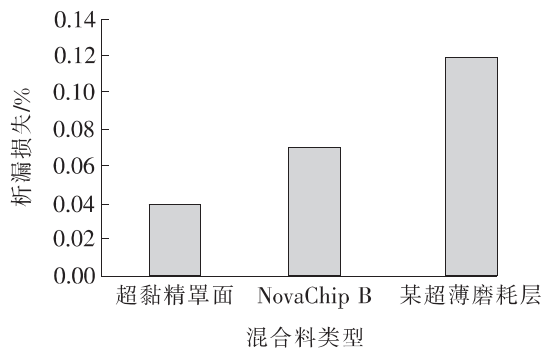


图 7 析漏试验结果

Fig. 7 Leakage test results

从图 6 可以看出:3 种薄层罩面的飞散损失均满足小于 20% 的要求。其中,超黏精罩面的飞散损失最小,为 3.6%,这是因为超黏精罩面属于级配更加连续的半开级配类型,其马歇尔试件更加密实,矿料之间的嵌挤能力更强,同时超黏韧沥青增强了矿料间的黏聚力,混合料的抗荷载冲击能力更强。从图 7 可以看出:3 种薄层罩面的析漏损失均满足小于 0.3% 的要求。其中,超黏精罩面的析漏损失最小,为 0.04%,这是因为对超黏精罩面的矿料级配进行了优化,其矿粉的用量与油石比

呈正相关关系,因此在级配的设计过程中可以调整矿粉用量来保证油石比不会过大,同时超黏稠沥青也具有更好的高温稳定性。

2.5 摆值及渗水系数试验

薄层罩面对抗滑及排水性能有着更高的要求。良好的抗滑性能能保证行车的安全性,减少交通事故的发生,而良好的排水性能能使路面的积水快速排出,保持路面结构层干燥,减少雨水对沥青路面的侵蚀,提高沥青路面的水稳定性。本研究利用车辙板试件进行摆值及渗水系数试验来评价3种薄层罩面的抗滑及排水性能,结果见图8~9。

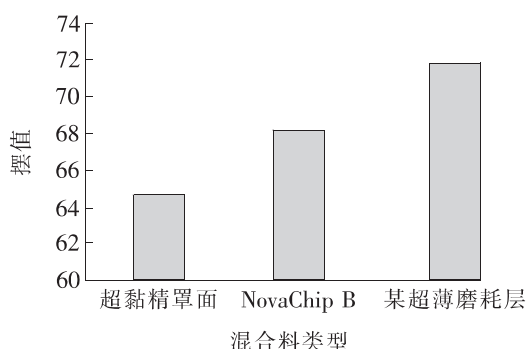


图8 摆值试验结果

Fig. 8 Pendulum test results

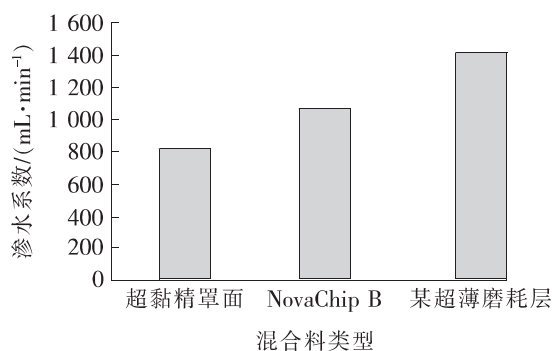


图9 渗水系数试验结果

Fig. 9 Test results of permeability coefficient

从图8可以看出:3种薄层罩面的摆值均满足高速公路摆值不小于50的要求。其中,超黏精罩面的摆值最小,为64.6,这主要是因为超黏精罩面的设计空隙率较小,导致其路表构造深度比另外两种薄层罩面的小。从图9可以看出:3种薄层罩面的渗水系数均大于800 mL/min,表明它们均具有较好的排水性能。其中,超黏精罩面的渗水系数最小,为825 mL/min。

3 结论

在现有薄层罩面技术的基础上,本研究开展

了超黏精罩面的配合比设计,并与市场上某超薄磨耗层及NovaChip B薄层罩面的高温抗车辙、低温抗开裂、抗水损害、抗滑及排水等路用性能做对比,得出以下主要结论:

1) 当试验温度相同时,超黏精罩面的动稳定度最大,NovaChip B罩面的最小;当试验温度从60℃升高到70℃时,3种薄层罩面的动稳定度均显著降低,超黏精罩面的降低幅度最小。

2) 3种薄层罩面的低温抗开裂、抗水损害、抗荷载冲击、施工和易性等性能均能满足改性沥青混合料相关技术指标的要求,而超黏精罩面这些技术指标的试验结果均最优;市面上某超薄磨耗层的抗滑及排水性能最优,但超黏精罩面也表现出良好的抗滑及排水性能。因此,级配优化后的超黏精罩面的路用性能整体最优。

〔参考文献〕

- [1] 祝轩. 超薄罩面层沥青混合料设计与路用性能研究[D]. 广州:广州大学,2019:1-2.
ZHU Xuan. Research on design and road performance of asphalt mixture with ultra thin overlay[D]. Guangzhou:Guangzhou University,2019:1-2.
- [2] 王寿辉. 高速公路病害诊断与养护决策研究[D]. 济南:山东大学,2011:17-20.
WANG Shou-hui. Research on expressway disease diagnosis and maintenance decision[D]. Jinan:Shandong University,2011:17-20.
- [3] 郑健龙. 基于结构层寿命递增的耐久性沥青路面设计新思想[J]. 中国公路学报,2014,27(1):1-7.
ZHENG Jian-long. New idea of durability asphalt pavement design based on increasing life of structural layer[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014,27(1):1-7.
- [4] 刘娜. 旧沥青路面薄层罩面的养护时机及层间技术研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2014:8-12.
LIU Na. Study on the time and technology of the old asphalt pavement[D]. Changsha:Changsha University of Science & Tcehnology,2014:8-12.
- [5] 黄洁羽. 高黏改性 SMA-13 沥青混合料的工程应用研究[D]. 北京:北京建筑大学,2018:4-9.
HUANG Jie-yu. Research on engineering application of high viscosity modified SMA-13 asphalt mixture [D]. Beijing:Beijing University of Civil Engineering and Architecture,2018:4-9.

- [6] 王颖. 浙江高速公路沥青路面预防性养护研究[D]. 杭州:浙江大学,2017:28-36.
WANG Ying. Research on preventive maintenance of asphalt pavement of Zhejiang expressway[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017:28-36.
- [7] HICKS R G, MOULTHROP J S, DALEIDEN J. Selecting a preventive maintenance treatment for flexible pavements[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1999, 1 680:1-12.
- [8] 虞将苗, 陈富达, 彭馨彦, 等. 高韧超薄沥青磨耗层在港珠澳大桥珠海人工岛通道上的应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(1):48-56.
YU Jiang-miao, CHEN Fu-da, PENG Xin-yan, et al. Application of high toughness and ultra thin asphalt wearing course in Zhuhai artificial island passage of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2020, 60(1):48-56.
- [9] 梁娟. 水性环氧乳化沥青混合料薄层罩面路用性能研究[D]. 广州:广州大学,2019:33-39.
LIANG Juan. Study on pavement performance of thin layer overlay of waterborne epoxy emulsified asphalt mixture [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2019:33-39.
- [10] 刘丽. 杂化纤维与高模量剂复合改性宽温域薄层罩面沥青混合料性能研究[J]. 公路工程, 2016, 41(6):219-226.
LIU Li. Study on performance of hybrid fiber and high modulus agent composite modified wide temperature range thin layer overlay asphalt mixture [J]. Highway Engineering, 2016, 41(6):219-226.
- [11] 钱璞, 李俊. 硅藻土改性沥青混合料高温性能分析[J]. 中外公路, 2017, 37(5):281-284.
QIAN Pu, LI Jun. High temperature performance analysis of diatomite modified asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(5): 281-284.
- [12] 何培龙, 王鹏. 钢渣在超薄磨耗层中的应用研究[J]. 山西建筑, 2015, 41(30):114-116.
HE Pei-long, WANG Peng. Application of steel slag in ultra thin wear course[J]. Shanxi Architecture, 2015, 41(30):114-116.
- [13] 杜宇兵, 邹晓翎, 阮鹿鸣, 等. 基于灰色关联理论的沥青薄层罩面层间剪应力影响因素研究[J]. 中外公路, 2018, 38(3):57-62.
DU Yu-bing, ZOU Xiao-ling, RUAN Lu-ming, et al. Study on influencing factors of interlaminar shear stress of asphalt overlay based on grey correlation theory[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(3):57-62.
- [14] 孔令绅, 李文凯. 不同纤维沥青混合料性能研究[J]. 河南科学, 2020, 38(5):791-796.
KONG Ling-shen, LI Wen-kai. Study on performance of asphalt mixture with different fibers[J]. Henan Science, 2020, 38(5):791-796.
- [15] 李志刚, 李文凯. DXG-1 抗车辙剂沥青混合料路用性能研究[J]. 河南科学, 2020, 38(8):1 264-1 269.
LI Zhi-gang, LI Wen-kai. Study on pavement performance of DXG-1 anti rutting agent asphalt mixture[J]. Henan Science, 2020, 38(8):1 264-1 269.
- [16] 代霞. 不同工艺制备的 SBS 改性沥青混合料性能研究[J]. 公路与汽运, 2020(6):53-56.
DAI Xia. Study on performance of SBS modified asphalt mixture prepared by different processes[J]. Highways & Automotive Applications, 2020(6): 53-56.
- [17] 刘建芳, 李九苏, 杨帆, 等. 反应型冷拌沥青混合料制备及性能研究[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(2):16-20.
LIU Jian-fang, LI Jiu-su, YANG Fan, et al. Research on reactive liquid asphalt mixture[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(2): 16-20.
- [18] 李睿. 热拌薄层罩面混合料设计及路用性能研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2018:45-47.
LI Rui. Study on design and road performance of hot mix thin overlay mixture [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2018:45-47.
- [19] 王庆, 李文凯. 盐-雾耦合作用对沥青混合料路用性能的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(4):9-15.
WANG Qing, LI Wen-kai. Influence of salt-fog coupling on the pavement performance of asphalt mixture[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2020, 17(4):9-15.