DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260660

基于福永高速预防养护工程的超薄罩面性能试验研究

陈　谦
(福建省高速公路养护工程有限公司,福建 福州 350001)

摘　要: 福建沿海区域夏季持续高温、空气湿度大,沥青路面易产生泛白、集料剥落、裂缝等病害,传统养护方式适用性不足。以福永高速预防性养护工程为依托,采用高粘改性沥青、玄武岩集料等原材料,开展半开级配超薄罩面配合比设计与性能试验。经马歇尔试验确定最佳油石比为6.5%,该配比混合料空隙率、稳定度等指标表现优良。路用性能检测显示,混合料高温抗车辙、水稳定、低温抗裂、排水及抗滑性能均满足并优于规范要求,其中60 ℃车辙动稳定度达6 187次/mm,渗水系数为1 632 ml/min。现场试验段施工温度、压实度、摊铺厚度均达标,层间平均粘结强度0.68 MPa,整体施工质量良好。研究结果表明,该超薄罩面技术可有效应对沿海高温高湿环境下的路面病害,可为华南湿热沿海地区高速公路沥青路面预防性养护提供工程参考。

关键词: 沿海高速;预防性养护;配合比设计;超薄罩面;路用性能
中图分类号: U418　　**文献标志码:** B　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0344-05

Experimental Study on Performance of Ultra-Thin Overlay Based on Preventive Maintenance Project of Fuyong Expressway

CHEN Qian
(Fujian Expressway Maintenance Engineering Co., Ltd., Fuzhou 350001, China)

Abstract: In the coastal areas of Fujian Province, persistent high temperatures and high humidity in summer frequently cause distresses such as whitening, aggregate stripping and cracking in asphalt pavements, making conventional maintenance methods inadequate. Based on the preventive maintenance project of the Fuyong Expressway, the raw materials such as high-viscosity modified asphalt and basalt aggregates are used to conduct the mix proportion design and performance tests of the semi-open graded ultra-thin overlay. The optimum asphalt-aggregate ratio is determined as 6. 5% through Marshall tests, and the void ratio, stability and other indicators of this proportioned mixture perform well. Pavement performance tests demonstrates that the high-temperature rutting resistance, water stability, low-temperature crack resistance, drainage and anti-slip performance of the mixture all meet and exceed the specification requirements, in which the rutting dynamic stability at 60 ℃ reaches 6187 times /mm, and the water seepage coefficient is 1632 ml/min. The construction temperature, compaction degree and paving thickness of the field trial sections all meet the required standards, with an average interlayer bonding strength of 0. 68 MPa, indicating good overall construction quality. This study result confirms that the ultra-thin overlay technology can effectively address pavement distresses under the hot and humid coastal environment, which provides a practical engineering reference for preventive maintenance of asphalt pavements on expressways in the hot and humid coastal regions of South China.

Keywords: coastal expressway; preventive maintenance; mix proportion design; ultra-thin overlay; pavement performance

0　引　言

福建省沿海区域属于亚热带海洋性气候,夏季高温持续时间长、空气相对湿度高,路面长期处于高温与雨水浸润交替作用的湿热服役环境[1-3]。高温不仅加速沥青胶结料的热氧老化、降低分子内聚力,其与水分交替作用更易削弱沥青-集料界面粘附性,导致运营中后期路表频繁出现泛白、细集料剥落及纵向微裂缝等功能性病害[4-5]。此类病害发展周期短、反复修补频次高,显著增加了高速公路的常态化养护成本[6-7]。针对上述病害,国内常用的薄层热拌罩面、微表处及碎石封层等预养护手段各有适用局限[8-10]。超薄罩面因具备摊铺厚度薄、施工速度快、

收稿日期: 2026-06-11
作者简介: 陈谦(1986—),男,学士,工程师,从事高速公路路面工程施工工作。

原路面扰动小及高温耐久性突出等优势,理论上成为处置高速功能性病害的理想方案之一[11-12]。然而,目前国内相关研究多集中于北方低温或内陆干燥地区,针对东南沿海全年高温多雨特定工况下的成套原材料选型、配合比设计及实体工程应用,尚缺乏系统性研究[13-14]。此外,已有成果多侧重于高温抗车辙或低温抗裂等单项性能,对于高温、高湿耦合作用下水稳定性、层间粘结力及长期耐久性的多指标协同体系研究较少。

为此本文依托福永高速养护工程,结合现场监测与室内试验,探究沿海路面病害发展规律与材料耐久特性,开展超薄罩面配合比设计、性能检测及施工管控研究,为华南湿热沿海地区沥青路面预防性养护提供技术参考。

1　工程概况与原材料性能检测

1.1　工程概况

本文依托的福永高速路面预防养护工程位于福建省沿海地区。福永高速起于福州南屿镇柳浪村终于永泰县梧桐镇潼关村,全长 66.305 km,该路段采用双向六车道高速公路标准建设,设计时速 100 km/h,于 2013 年 5 月建成通车,路面设计使用年限为 15 年。至 2025 年该路已运营近 14 年,即将达到设计寿命。受常年高温高湿气候持续作用,路面表层沥青老化明显,全线出现大面积泛白、细集料剥落、纵向接缝细微裂缝等功能性病害。原路面结构见图 1,具体病害统计结果见表 1。

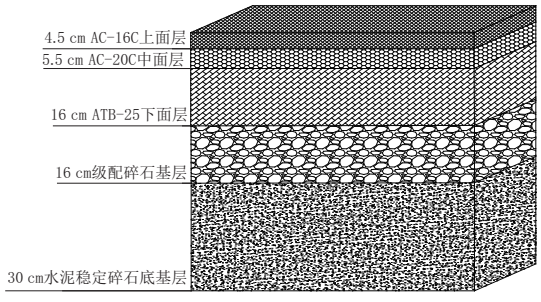


图 1　福永高速路面结构

从表 1 可知,路面整体技术状况指数 PQI 优等率超过 98%,但表面层开始出现泛白、掉粒和轻微裂缝等典型老化病害。上行方向泛白病害占比略高于下行方向,轻微裂缝主要出现在纵向接缝附近,占比约 45%。上述病害表明沥青胶结料性能下降、集料裹覆力减弱,路面进入功能性衰减阶段需要采取预防养护措施。

表 1　福永高速路面主要病害类型及分布统计结果

病害类型	方向	出现路段比例/%	平均出现里程/km	主要分布位置
路面泛白	上行	86.3	12.6	行车道轮迹带
路面泛白	下行	78.9	11.4	行车道轮迹带
细集料剥落	上行	70.2	10.2	全断面均匀分布
细集料剥落	下行	64.6	9.3	全断面均匀分布
轻微裂缝	上行	48.5	7.1	纵向接缝附近
轻微裂缝	下行	41.9	6.1	纵向接缝附近

1.2　改性沥青胶结料

本文采用专门配制的超薄罩面用高粘改性沥青。该胶结料以 SBS 为改性剂,经过特殊工艺制备,并对其主要性能指标进行检测,检测结果见表 2。

表 2　超薄罩面改性沥青胶结料性能检测结果

试验项目	单位	检测结果	技术要求
针入度(25 ℃,100 g,5 s)	0.1 mm	52	40~60
软化点(TR&B)	℃	98.6	不小于 90
延度(5 ℃,5 cm/min)	cm	48	不小于 40
黏韧性(25 ℃)	N·m	23.6	不小于 20
弹性恢复(25 ℃)	%	91	不小于 85
动力粘度(60 ℃)	Pa·s	403 200	不小于 200 000
TFOT 后针入度比	%	78	不小于 75
TFOT 后延度(5 ℃)	cm	32	不小于 20

从表 2 可知,该胶结料软化点达 98.6 ℃,60 ℃动力粘度超 40 万 Pa·s,高温下具有极佳的抗流动能力,在常温下具备优异的弹性恢复和抗变形能力。经过薄膜烘箱老化后,残留物的针入度比达到 78 %,延度保留值为 32 cm。这说明该胶结料具有良好的抗老化性能,能够长期维持对集料的裹覆力。

1.3　集料与矿粉

本文选用的粗集料为玄武岩,该石料岩性稳定、硬度高且与沥青粘附性好。对粗集料的主要性能指标按照《公路工程集料试验规程》进行检测[15],检测结果见表 3。

表 3　粗集料性能检测结果

试验项目	单位	检测结果	技术要求
磨光值 PSV	–	44	不小于 42
洛杉矶磨耗损失	%	16.8	不大于 20
压碎值	%	14.2	不大于 18
表观相对密度	g/cm^3	2.934	不小于 2.6
吸水率	%	1.2	不大于 2
针片状颗粒含量	%	8.5	不大于 12
与沥青粘附性等级	级	5	不小于 4
软石含量	%	0.3	不大于 1

细集料采用石灰岩机制砂,经 100% 破碎加工而成。矿粉由石灰岩磨细制备。细集料与矿粉的主要

性能检测结果见表4、表5。

表4　细集料性能检测结果

试验项目	单位	检测结果	技术要求
砂当量	%	68	不小于60
细集料棱角性	s	45	不小于40
表观相对密度	g/cm^3	2.671	不小于2.5
亚甲蓝值	g/kg	1.2	不大于2.5

表5　矿粉性能检测结果

试验项目	单位	检测结果	技术要求
表观相对密度	g/cm^3	2.685	不小于2.5
含水量	%	0.6	不大于1
亲水系数	–	0.6	不大于1
塑性指数	%	2.5	不大于4
0.075 mm筛通过率	%	82	75~100

2　配合比设计

2.1　级配选择与油石比确定

超薄罩面混合料采用半开级配。这种级配能够形成较大的连通空隙,利于路表水快速排出并提高抗滑性能。本研究选用三档集料进行配料,分别为0~3 mm、3~6 mm和6~9 mm。通过反复调试合成级配曲线,使各筛孔通过率满足设计级配范围。在确定级配后分别选取5.6%、5.9%、6.2%、6.5%、6.8%五个油石比进行马歇尔试验。每个油石比成型6个马歇尔试件,双面击实50次。试验结果见表6。

表6　不同油石比下超薄罩面混合料马歇尔试验结果

油石比/%	毛体积相对密度/(g·cm^{-3})	空隙率VV/%	矿料间隙率VMA/%	稳定度MS/kN	流值FL/mm
5.6	2.341	12.8	18.6	6.7	2.7
5.9	2.364	11.5	18.1	7.4	3.0
6.2	2.387	11.0	17.8	7.9	3.2
6.5	2.392	10.6	17.6	8.3	3.4
6.8	2.380	9.3	17.2	7.2	3.8
技术要求	–	>10	实测	≥6.0	实测

从表6可知,油石比从5.6%逐步增至6.5%时,毛体积相对密度由2.341 g/cm^{3}持续上升至2.392 g/cm^3;当油石比继续提升至6.8%后,密度回落至2.380 g/cm^3,说明6.5 %为混合料密实度最优节点。空隙率随着油石比增加持续降低,从12.8%降至9.3%。半开级配混合料要求空隙率不小于10 %以保障排水与抗滑功能,6.8%油石比下空隙率已不满足规范要求,因此油石比不宜超过6.5%。稳定度随油石比呈现先升后降的变化规律,在6.5%时达到峰值8.3 kN,油石比增至6.8%后稳定度明显下降。为了进一步明确油石比对空隙率和稳定度的影响规律,绘制了其关系曲线图,见图2。

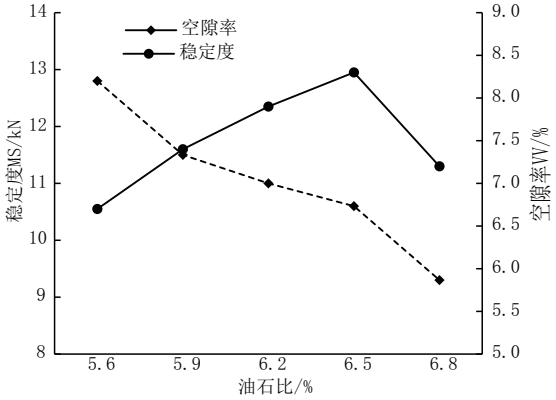


图2　油石比-空隙率与稳定度关系曲线图

如图2所示,空隙率随油石比增加呈线性下降趋势,而稳定度呈现先升后降的抛物线特征。综合空隙率不小于10%、稳定度最大化两项原则,最终确定最佳油石比为6.5%。在该油石比下混合料的空隙率为10.6%,稳定度为8.3 kN,两者均处于理想区间。

2.2　体积指标随油石比的变化规律

为了进一步分析混合料密实程度和骨架结构的变化趋势,本文将不同油石比下毛体积相对密度和VMA的变化规律展开探究,明确两项指标随沥青用量增减的演变特征与内在关联,结果见图3。

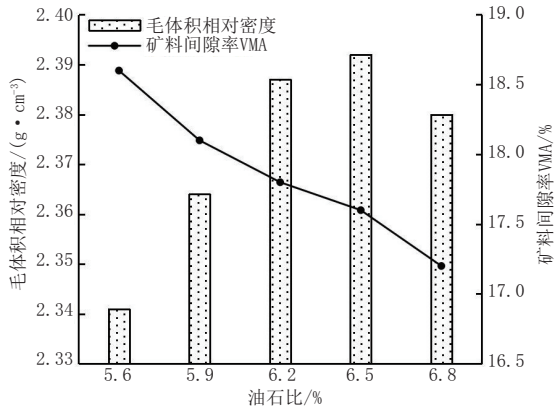


图3　不同油石比下毛体积相对密度与VMA变化曲线图

如图3所示,毛体积相对密度随着油石比增加先增大后减小,在6.5%油石比时达到峰值2.392 g/cm^3。这是因为初始阶段沥青起到润滑和填充作用,使混合料更容易压实。当油石比超过6.5%后,富余自由沥青撑开集料骨架,混合料整体密度出现下降。矿料间隙率VMA从18.6%持续减小至17.2%,全程处于合理范围内,说明矿料间隙可容纳足量沥青。整体数据变化规律平稳,验证了所选级配具有良好的骨架嵌挤特性。

3　路用性能验证

以最佳油石比 6.5% 成型混合料试件,进行路用性能全面验证。试验项目包括高温车辙、水稳定性、低温抗裂、渗水与抗滑性能。检测结果汇总于表 7。

表 7　超薄罩面混合料路用性能试验结果

试验项目	单位	检测结果	技术要求	试验方法
60℃车辙动稳定度	次/mm	6187	不小于 3 000	T0719
浸水残留稳定度	%	89.6	不小于 85	T0709
冻融劈裂强度比 TSR	%	86.2	不小于 80	T0729
−10℃最大弯拉应变	με	2751	不小于 2500	T0715
渗水系数(半开级配)	ml/min	1632	不小于 500	T0730
构造深度	mm	0.92	不小于 0.7	铺砂法

从表 7 可知,高温车辙动稳定度达到 6 187 次/mm,远超 3 000 次/mm 的技术要求。这说明半开级配粗集料骨架与高粘改性沥青共同赋予了混合料优异的抗车辙能力。浸水残留稳定度为 89.6%,冻融劈裂强度比为 86.2%,两项水稳定性指标均高于规范限值。这得益于玄武岩与改性沥青之间高达 5 级的粘附性以及密实的压实效果。低温最大弯拉应变为 2 751 με,满足 2 500 με 的要求,说明混合料在低温环境下具备良好的柔韧性和抗开裂能力。渗水系数 1 632 ml/min 和构造深度 0.92 mm 均显著优于半开级配的基本要求。这意味着罩面层能够快速排除路表积水并在潮湿条件下提供可靠摩擦力。

4　现场施工质量与检测

4.1　施工关键工序温度监测

在福永高速路面预防养护工程中选取了 200 m 试验段进行现场施工,并对混合料生产与摊铺过程中的温度进行检测。结果见图 4。

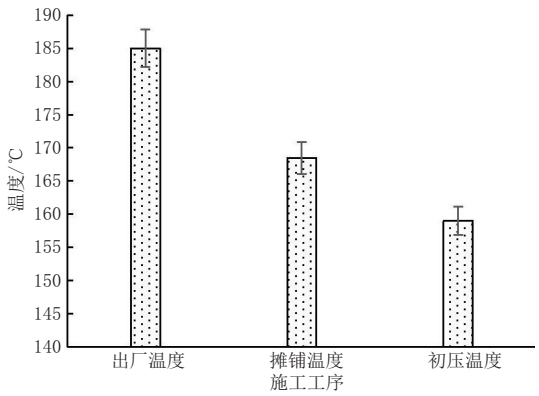


图 4　超薄罩面施工关键工序温度分布图

如图 4 所示,混合料出厂温度平均值控制在 185.0 ℃左右,波动范围约±2.8 ℃。运至现场后的摊铺温度平均值保持在 168.5 ℃左右,波动约±2.4 ℃,全部大于 160 ℃的设计下限。初压温度平均值介于 159.0 ℃左右,波动约±2.1 ℃,全部高于 150 ℃的控制标准。上述温度数据说明拌和、运输与摊铺工序衔接紧密,混合料温度损失控制得当,为压实提供了良好条件。

4.2　压实度与摊铺厚度检测

碾压完成后在试验段内均匀布设 5 个测点,采用钻芯取样法检测压实度和厚度。检测结果见表 8。

表 8　试验段压实度与厚度检测结果

测点编号	压实度/%	厚度/mm
1	98.2	15.0
2	98.5	15.3
3	98.9	15.1
4	98.4	15.4
5	98.8	15.2
平均值	98.56	15.2

从表 8 可知,5 个测点的压实度平均值为 98.56%,高于设计要求的 97%;厚度平均值为 15.2 mm,满足设计厚度要求(15±2 mm)。压实度达标得益于原材料的优良特性与配合比设计的合理性。高粘改性沥青在压实温度下具有较低的运动粘度,为集料提供了充分的润滑作用使混合料易于压实。玄武岩粗集料压碎值仅 14.2% 且针片状含量控制在 8.5% 以内,颗粒形状规则不易在压实过程中发生破碎或重新排列。最佳油石比 6.5% 保证了混合料在击实或碾压时沥青既不过少导致松散也不过量引起推移。厚度均匀且偏差在±0.4 mm 以内,说明半开级配混合料在摊铺后具有良好的稳定性,未出现因骨架松散或沥青流淌造成的厚度变异。

4.3　层间粘结强度检测

采用拉拔试验检测超薄罩面与原路面的 72 h 粘结强度,试验环境温度为 20 ℃。检测结果见图 5。

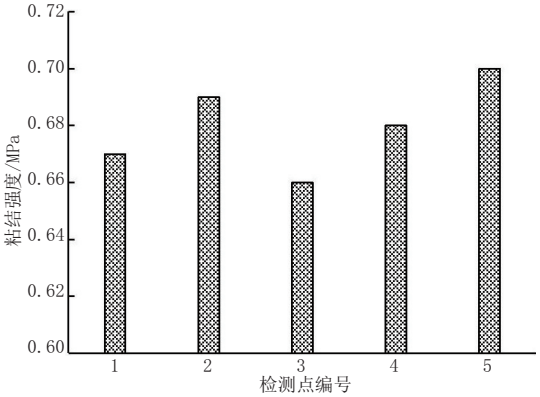


图 5　超薄罩面层间 72h 粘结强度检测结果

如图5所示，检测点的粘结强度介于0.66 MPa至0.70 MPa之间，平均值为0.68 MPa，远高于设计要求。各测点强度值波动较小，极差为0.05 MPa。粘结强度高的原因主要是超薄罩面混合料所采用的材料特性，高粘改性沥青胶结料软化点98.6 ℃、60 ℃动力粘度超40万Pa·s，25 ℃弹性恢复率高达91 %，优异的粘附性和内聚力使混合料与下承层形成牢固的化学与物理粘结。同时玄武岩粗集料与沥青的粘附性等级达到5级，细集料砂当量68%保证了混合料的洁净度，避免了粉尘对粘结界面的污染。

5　结　论

本文依托福永高速沿海路段预防性养护工程，结合室内性能试验与现场实体检测，系统开展超薄罩面材料选型、配合比设计、路用性能及施工质量研究，综合各项试验与监测结果，得到以下结论。

（1）福永高速长期处于沿海高温高湿环境，路面泛白病害上行路段占比86.3%、下行路段占比78.9%，细集料剥落、轻微裂缝等病害普遍出现，路面已进入功能性衰减阶段。本次选用的高粘改性沥青软化点98.6 ℃、60 ℃动力粘度403 200 Pa·s，玄武岩粗集料表观相对密度2.934 g/cm^3，集料粘附性等级为5级，各项指标均满足规范要求，材料抗老化、粘附与耐磨性能优异，完全适配沿海高温高湿服役工况。

（2）通过马歇尔试验完成半开级配混合料配合比设计，设置5.6%、5.9%、6.2%、6.5%、6.8%五组等梯度油石比开展试验，最终确定最佳油石比6.5%，对应混合料空隙率10.6%、稳定度约8.3 kN，矿料间隙率处于合理区间。当油石比提升至6.8%时，空隙率不满足半开级配使用要求，力学性能也出现下降，进一步验证6.5%为最优取值，混合料骨架嵌挤结构稳定，体积指标与力学性能表现良好。

（3）路用性能试验表明，混合料60 ℃车辙动稳定度达6 187 次/mm，浸水残留稳定度89.6%、冻融劈裂强度比86.2%，-10 ℃最大弯拉应变2 751 με，渗水系数1 632 ml/min，构造深度0.92 mm，各项指标均远超规范限值，综合路用性能突出。

（4）现场试验段施工温度管控稳定，混合料出厂、摊铺、初压平均温度分别为185.0 ℃、168.5 ℃、159.0 ℃；路面平均压实度98.56%，平均摊铺厚度15.2 mm，均满足设计标准。罩面层间72 h平均粘结强度达0.68 MPa，界面联结牢固。该超薄罩面施工便捷、养护成效显著，可为华南湿热沿海地区高速公路沥青路面预防性养护提供可靠技术参考。

参考文献：

[1] 彭林魏，赖淏，宗有杰，等.湿热地区复杂条件下沥青混合料水稳定性研究进展[J].复合材料学报，2025，42(9)：4836-4854.

[2] Wei J, Li Y, Ju H, et al. Performance damage evolution of asphalt mixture under large/quick humidity-temperature fluctuation cycles[J]. Case Studies in Construction Materials, 2025, 23e05079-e05079.

[3] 洪茂枝.多因素耦合作用下SBS改性沥青的老化行为研究[J].福建交通科技，2022(5)：1-6.

[4] 张廷才.普通公路沥青路面裂缝开裂原因及修复试验研究[J].城市道桥与防洪，2020(10)：62-64.

[5] 尚志刚.热老化对OGFC沥青混合料路用性能的影响[J].城市道桥与防洪，2017(1)：33-35.

[6] Zhang R, Sun L, Qiao Y, et al. Multidimensional comparative analysis of future climate change impacts on pavement infrastructure aging[J]. Transportation Research Part D, 2025, 142104702-104702.

[7] 胡江.高速公路沥青路面预防性养护对策研究[J].运输经理世界，2023(33)：125-127.

[8] 陈光宁.热拌沥青超薄罩面技术在路面预防性养护中的应用[J].福建建材，2021(2)：63-65；68.

[9] 闫志耀.公路工程微表处养护施工技术应用探讨[J].四川建材，2025，51(1)：114-116.

[10] 徐向正.同步碎石封层技术在公路路面施工中的应用研究[J].工程技术研究，2024，9(19)：70-72.

[11] 陆广衍.超薄罩面在市政道路预养护中的应用[J].城市道桥与防洪，2023(1)：239-241.

[12] 王晓列.超薄罩面层沥青混合料的路用性能研究[J].山西交通科技，2022(6)：13-16.

[13] 席凯博，孙亮，李宏亮，等.高黏沥青超薄罩面技术的工程应用[J].黑龙江交通科技，2024，47(9)：73-77.

[14] 范承娟.薄层罩面在路面病害整治工程中的应用研究[J].青海交通科技，2025，37(3)：13-17.

[15] JTG 3432—2024 公路工程集料试验规程 [S].