

沥青混合料超薄罩面应用研究

林海成, 柳 伟, 马 辉, 秦 岭

(中交基础设施养护集团宁夏工程有限公司, 宁夏 银川 750000)

摘要:为探索不同超薄罩面在宁夏地区高速公路养护工程中的实施效果,文章基于 G110 线宁夏高速公路养护工程,对两种密实型沥青混凝土超薄罩面结构 UTAC-10、AC-13C 的原材料及技术性能、混合料配合比设计、实施效果观测进行对比分析。通过马歇尔试验与渗水系数试验,确定了不同 RAP(再生沥青混合料)掺量下混合料的最佳配合比,并对其力学性能和抗水渗透性能进行了系统评价。结果表明:两种超薄罩面实施后,通过试验数据和现场检测,AC-13C 超薄罩面原材料在稳定度、流值、空隙率及饱和度等方面均满足规范要求,表现出优异的高温稳定性、密实性及适宜的柔性。同时,密实型级配混合料具有较低的渗水系数,适用于防水要求高的路面结构层。

关键词:超薄罩面; 高掺量 RAP; 马歇尔试验; 路用性能

中图分类号:U416.21

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)12-0047-06

doi:10.13402/j.gcjs.2025.12.149

Research on the application of ultra-thin overlays for asphalt mixtures

LIN Haicheng, LIU Wei, MA Hui, QIN Ling

(CCCC Infrastructure Maintenance Group Ningxia Engineering Co., Ltd., Yinchuan 750000, Ningxia, China)

Abstract: In order to explore the implementation effect of different ultra-thin coverings in the highway maintenance project in Ningxia area. Based on the maintenance project of G110 line Ningxia highway, the raw materials and technical performance, mix ratio design, implementation effect observation of two dense asphalt concrete ultra-thin illumination surface structure UTAC-10, AC-13C are compared and analyzed. Through the Marshall test and water penetration coefficient test, the optimal mix ratio of the mixture under different RAP (recycled asphalt mix) dosage was determined, and its mechanical properties and water penetration resistance were systematically evaluated. The results show that: after the implementation of the two kinds of ultra-thin cover, through the test data and on-site inspection, the raw material of AC-13C ultra-thin cover meets the specification requirements in terms of stability, flow value, void ratio and saturation, and exhibits excellent high temperature stability, compactness and suitable flexibility. At the same time, the dense graded mix has a low water seepage coefficient, which is suitable for the pavement structural layer with high waterproofing requirements.

Key words: Ultra-thin overlay; Highly doped RAP; Marshall test; Road performance

沥青路面凭借其优良的平整特性、较短维护周期、显著降噪效果、优异驾乘舒适性以及高效

通行能力等特点,已成为我国高等级公路建设的主流选择^[1-3]。然而,随着区域经济快速发展与

收稿日期:2025-03-19

基金项目:银川市科技计划项目(2024GX008)

作者简介:林海成(1974—),男,正高级工程师,从事固废综合利用、道路建筑材料方面的工作。

交通负荷的持续攀升,道路结构在长期承受交通荷载和环境侵蚀作用下,普遍产生车辙变形、应力裂缝、骨料剥落、局部塌陷等路用病害,因此科学实施预防性养护工程对延缓路面性能衰减、控制病害扩展具有重要工程价值^[4-5]。作为预防性养护体系中的代表性技术,超薄罩面层通过创新材料配比与施工工艺,在提升抗滑性能、增强密封效果、优化施工效率等方面展现出显著技术优势^[6-8]。

赵颖等^[9]通过以沥青混合料胶结理论为基础,从改善回收料胶结料对集料的胶结作用入手,改善了回收沥青混合料的施工和易性,水稳定性、热稳定性和抗开裂性能均满足超薄罩面技术要求。MALLICK 等^[10]于 2007 年提出将温拌技术与沥青路面再生技术相结合进行探索。张丛等^[11]通过配合比设计确定不同掺量条件下的最佳沥青用量,发现再生沥青混合料动稳定系数随 RAP 掺量增加而增加,RAP 掺量会降低再生沥青混合料的水稳定性。刘凯等^[12]采用微波加热的方式,以基质沥青作为胶结料,添加沥青再生剂和再生沥青混合料改性剂制备再生沥青混合料,结果表明:微波加热再生沥青混合料的高温-水稳定性较为突出,且明显优于常规热再生沥青混合料。陈良锐等^[13]通过制备聚丙烯腈纤维、聚酯纤维、木质素纤维、玄武岩纤维 4 种纤维外掺剂的沥青混合料进行路用性能试验,发现玄武岩纤维在 OGFC-13 沥青混合料中的改性效果最佳,但其掺量体积分数应控制在 0.3% 以内。王宏等^[14]探讨了养生温度对泡沫沥青冷再生混合料内部泡沫沥青分散性状及微细观空隙结构的影响规律。胡贵华等^[15]采用了再生剂与废旧沥青路面材料预再生的处理方式,并研究了预再生时间的影响,发现再生剂大幅提升了冷再生混合料的水稳定性、抗裂性及劈裂强度,推荐预再生时间为 5 d。陈飞等^[16]通过与无粘层、基质沥青黏层和 SBS 改性沥青粘层进行对比分析,温度是影响层间黏结性能的最显著因素。

本文基于 G110 宁夏高速公路养护工程,对两种密实型沥青混凝土超薄罩面结构 UTAC-10 和 AC-13C 的原材料及技术性能、混合料配合比设计进行研究,并就实施效果进行跟踪观测,以期

可为相关研究提供参考。

1 试验材料

1.1 沥青混合料配合比设计

研究采用的 RAP 材料取自宁夏宁兴元工贸有限公司回收的废旧沥青改性混合料,基于《公路沥青路面再生技术规范》(JTG/T 5521—2019)^[17]的技术要求,本研究针对两种再生沥青混合料开展配合比优化设计,其关键配合参数及性能指标分别如表 1~3 所示。

表 1 UTAC-10 沥青混合料配合比

新拌沥青混合料/%	集料规格/mm	矿料%	矿粉%	铣刨料 (0~9) mm/%
4.48	0~4	28		
	4~7	11	2	10
	7~11	39		

表 2 AC-13C 沥青混合料配合比

新拌沥青混合料/%	集料规格/mm	矿料%	矿粉%	40% RAP 掺量/%	
				(0~9) mm	(9~16) mm
3.60	0~4	19			
	4~7	4			
	7~11	19	2	10	20
	7~16	26			

表 3 RAP 的基本性质

检测项目	技术要求	实测值	试验方法
含水率/%	≤3	0.5	JTG/T 5142—01—2021
砂当量/%	≥60	65	T 0334—2005
表观相对密度/ (g·cm ⁻³)	实测	2.668	JTG E20—2011
毛体积相对密度/ (g·cm ⁻³)	实测	2.615	JTG E20—2011
吸水率/%	实测	0.69	JTG F40—2019

1.2 矿料级配设计

基于现行《公路工程集料试验规程》(JTG 3432—2024)^[18]技术标准,结合 UTAC-10 与 AC-13C 型沥青路面的级配控制要求,针对不同再生沥青混合料(RAP)掺量,开展矿料合成级配优化设计,确定各档矿料组成比例,如表 4、5 所示。

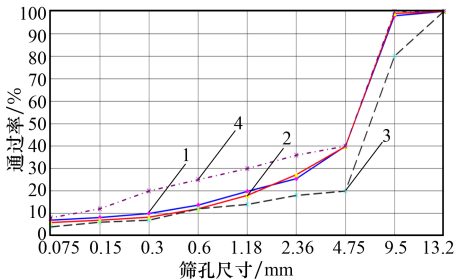
表 4 UTAC-10 型矿料级配

筛孔尺寸	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
实测级配	100	99.0	39.7	27.2	18.7	11.9	8.2	6.9	5.8
目标级配	100	98.0	40.0	25.5	19.8	13.7	10.0	8.1	6.9

表 5 AC-13C 型矿料级配

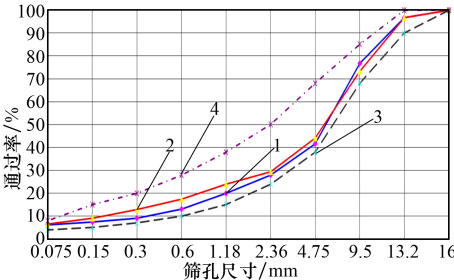
筛孔尺寸	16 mm	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
实测级配	100	96.7	76.7	41.6	28.0	19.9	13.1	9.0	7.4	6.1
目标级配	100	96.7	73.3	44.1	29.4	24.0	17.5	12.9	9.1	6.5

通过配比参数计算确定了新拌沥青混合料与回收沥青混合料(RAP)的合成级配方案。为提升再生混合料的路用性能,通过调整集料分布使级配曲线趋近于规范区间的中值区域,并且级配曲线尽量呈“S”型。因此,本文以以中值级配的偏差平方和最小化为首要优化目标,避免级配曲线呈锯齿状的原则进行合成级配设计,合成级配如图 1、2 所示。



1—合成级配; 2—级配中值; 3—级配下限; 4—级配上限。

图 1 UTAC-10 型沥青混合料骨料级配



1—合成级配; 2—级配中值; 3—级配下限; 4—级配上限。

图 2 AC-13C 型沥青混合料骨料级配

2 试验方案设计

2.1 试验设备

研究的仪器设备有 WSY-104 离心式分离抽提仪、DCAT21 表面张力仪、SYD-4508C 延度仪、布氏旋转黏度计、WSY-103 马歇尔电动击实仪、WSY-101 全自动马歇尔稳定度试验仪等,所

用仪器均符合相关规范要求^[19]。

2.2 沥青混合料渗水系数试验

沥青混合料渗水系数试验是用于评估沥青混合料抗水渗透性能的一种试验方法,以检验沥青混合料的配合比设计。通过现场随机确定测试点位,依据《公路路基路面现场测试规程》(JTG 3450—2019)^[20]进行渗水系数检测,按照公式(1)进行计算。

依据式(1)计算路面渗水系数 C_w :

$$C_w = \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1} \times 60 \tag{1}$$

式中: C_w 为沥青混合料试件的渗水系数, mL/min; V_2 为第一次读数时的水量(通常为 100 mL), mL; V_1 为第二次读数时的水量(通常为 500 mL), mL; t_2 为第一次读数时的时间, s; t_1 为第二次读数时的时间, s。

2.3 马歇尔试验

马歇尔试验作为确定沥青混合料最佳油石比的核心方法。试验过程中,试件需按照试验规程要求,在 $(60 \pm 1)^\circ\text{C}$ 恒温水浴中养护 30 ~ 40 min 后,通过标准击实法(双面各击实 75 次)成型圆柱体试件。随后采用马歇尔试验仪测定沥青混合料的稳定度、流值等关键力学指标,同时结合空隙率(VV)、矿料间隙率(VMA)、沥青饱和度(VFA)等体积参数进行多指标综合分析,最终通过绘制油石比-技术指标关系曲线确定具有最优路用性能的沥青材料配比参数。

3 试验结果分析与讨论

3.1 沥青混合料渗水系数试验结果及分析

通过表 6 与表 7 的渗水系数实测数据可知,UTAC-10 型混合料在两处试验位置的渗水系数平

均值为 566.5 mL/min；而 AC-13C 型混合料在两处试验位置的渗水系数平均值为 298 mL/min。结果表明，UTAC-10 的渗水系数高于 AC-13C，这一差异主要由两者的级配类型不同所致。结合表 4 和表 5 的级配设计可知，UTAC-10 的矿料级配偏向开级配特征，其 4.75 mm 筛孔通过率为 39.7%，低于 AC-13C 的 41.6%，导致混合料内部连通孔隙较多，透水性能较强；而 AC-13C 的密实型级配（如 2.36 mm 筛孔通过率 28.0% 接近目标级配中值）有效减少了孔隙连通性，从而表现出更低的渗水系数。综上，密实型 AC-13C 混合料通过优化级配与材料配比，在抗水渗透性能方面表现优异，适用于防水要求较高的路面结构层；而开级配 UTAC-10 的高渗水系数则更适合用于排水功能优先的路面场景。渗水系数受级配类型、压实度和油石比的综合影响，其中级配是主导因素。通过合理调整级配设计和施工参数（如压实度），可实现沥青混合料的渗透性能与耐久性的优化平衡。如图 3、4 所示。



图 3 现场渗水检测

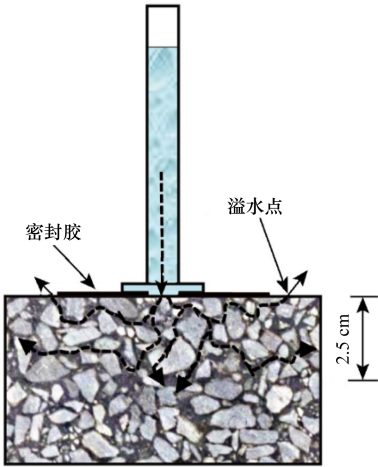


图 4 水流示意图

表 6 UTAC-10 渗水系数实测结果

序号	位置	实测渗水系数/ (mL·min ⁻¹)
1	K1323+205 右侧行车道	600
2	K1323+195 左侧行车道	533

表 7 AC-13C 渗水系数实测结果

序号	位置	实测渗水系数/ (mL·min ⁻¹)
1	K1323+710 右侧行车道	320
2	K1323+690 左侧行车道	276

3.2 马歇尔试验结果及分析

根据表 8 中的马歇尔试验数据，沥青混合料的各项性能指标均满足规范要求，且多数指标表现优异。具体来看，稳定度达到 14.48 kN，远超规范最低值（≥5.0 kN），表明混合料具有极强的抗塑性变形能力，能够承受高负荷交通条件下的长期作用。这一结果与混合料的密实级配设计及合理的油石比（3.60%）密切相关，密实的矿料骨架与适度的沥青填充协同提升了混合料的整体强度。流值测试结果为 3.9 mm，接近规范上限（2~4.5 mm），但仍处于合理区间。较高的流值表明混合料具备适度的柔性，能够在温度变化或交通荷载下通过微小变形释放应力，从而减少开裂风险。结合稳定度与流值数据可知，该混合料兼具高强度与良好变形协调性，符合高等级路面材料综合性能的要求。空隙率为 4.7%，表明混合料内部结构密实且均匀。该孔隙率既能减少水分渗透导致的损害，又可为沥青的热胀冷缩提供缓冲空间，有利于提升混合料的耐久性。矿料间隙率为 15.3%，大于规范要求的最低值，表明矿料骨架具有足够的间隙容纳沥青，既保证了结构稳定性，又避免了因间隙不足导致的沥青过度填充问题。饱和度为 67.8%，符合规范要求（65%~75%），说明矿料间隙中沥青的填充程度适中，既不会出现流动现象，也能够防止矿料骨架间产生空隙水损害。综合来看，AC-13C 混合料通过优化级配与油石比，在稳定度、流值、空隙率等关键指标上均达到了较为平衡的状态，既满足高等级路面的强度需求，又兼顾了柔性及耐久性。试验结果充分证明，该混合料适用于高交通负荷、严苛环境

条件下的路面铺设, 为超薄罩面技术的推广应用提供了可靠依据。

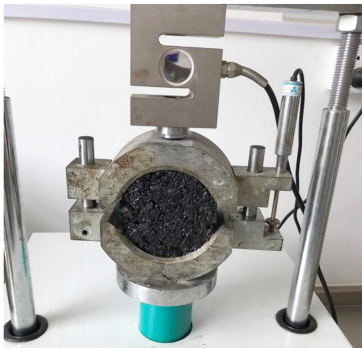


图 5 沥青混合料马歇尔试验

表 8 马歇尔试验测试结果

测试项	结果	技术要求
空隙率/%	4.70	3~6
间隙率/%	15.30	≥14.7
有效沥青饱和度/%	67.80	65~75
稳定度/kN	14.48	≥5.0
流值/mm	3.90	2~4.5

3.3 路面钻芯

通过对 UTAC - 10、AC - 13C 两种混合料实施路段路面进行取样。典型芯样结果如表 9、图 6 所示。

表 9 芯样统计表

序号	取样位置	实测厚度/mm	技术指标/mm	备注
1	K1 323 + 410 右 2.5 m	—	≥30	上部微表处 芯样较完整



图 6 G110K1323 + 410 右 2.5 m

根据表 9 中芯样结果可以看出, 芯样整体完整, 未出现层间脱空或松散现象, 表明混合料兼具强度与柔性, 能够适应层间变形需求。试验段铺筑的两种沥青混合料结构层取样厚度均值与设

计值吻合度基本一致, 且所取芯样经观测均呈现结构致密、无显著层间缺陷的特征。

4 结 论

(1) 两种超薄罩面实施后, 通过试验数据和现场测试来看, 两种沥青混合料在稳定度、空隙率、饱和度等关键指标上均满足规范要求, 密实型级配 AC - 13C 混合料表现出良好的高温稳定性、及抗水渗透性能, 适用于高交通负荷路面的防水结构层。开级配 UTAC - 10 混合料, 适用于需快速排水的表层铺装, 二者功能定位明确, 可针对不同工程需求灵活选用。

(2) RAP 掺量对混合料性能的影响显著。UTAC - 10 混合料中的 RAP 掺量通过粗集料补充优化了级配连续性; AC - 13C 混合料中 40% 的 RAP 掺量通过细集料平衡与多档铣刨料配比, 既提升了资源利用率, 又未对密实性与抗渗性能产生负面影响, 验证了高掺量 RAP 在超薄罩面中的可行性。

(3) 钻芯检测与马歇尔试验结果表明, 两种混合料的结构层厚度控制、层间黏结性能及矿料骨架稳定性均达到设计要求。芯样致密均匀, 透水性良好且层间无剥离, 表明级配设计与施工工艺的合理性。但 UTAC - 10 混合料局部渗水系数波动需进一步优化施工均匀性, 尤其是开级配混合料的孔隙率控制。

参考文献:

[1] GUO M,ZHANG R,DU X,et al. A state-of-the-art review on the functionality of ultra-thin overlays towards a future low carbon road maintenance[J]. Engineering,2024(32): 82-98.

[2] 董秉瑶,李博楠. 脱硫胶粉改性沥青的制备及其高温性能评价研究[J]. 工程建设,2024,56(6):67-71.

[3] 布鹏,陈飞,王永俊,等. 后掺法温拌环氧沥青超薄罩面性能研究[J]. 应用化工,2022,51(12):3570-3575.

[4] 肖敏敏,钱思博. 基于改进内聚力模型的沥青超薄罩面层间失效行为分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022,56(9):1780-1788.

[5] 董海东,麻旭荣,裴秋波,等. 基于斜剪试验的超薄罩面层间黏结性能研究[J]. 公路,2022,67(4):94-97.

[6] 苏卫国,朱洋. 水泥路面上超薄沥青罩面主被动抗反射裂缝应用研究[J]. 河南科技大学学报(自然科学

- 版),2022,43(3):55-62;8.
- [7] 张楠,范群保,郑南翔.气孔玄武岩超薄罩面沥青路面降温效果和性能研究[J].硅酸盐通报,2021,40(10):3523-3532.
- [8] 柴冲冲.1cm厚超薄罩面在公路工程中的应用分析[J].公路,2019,64(10):269-272.
- [9] 赵颖,冯驰,都魁林.基于黏结性恢复的再生超薄罩面研究与应用[J].公路,2024,69(6):79-84.
- [10] MALLICK R B,BRADLEY J E,BRADBURY R L. Evaluation of heated reclaimed asphalt pavement material and wax-modified asphalt for use in recycled hot-mix asphalt [J]. Transportation research record:journal of the transportation research board,2007,1998(1):112-122.
- [11] 张丛,唐文洋,张轩铭,等. RAP 掺量对厂拌热再生沥青混合料路用性能的影响[J]. 工程建设,2025,57(3):-11;17.
- [12] 刘凯,高国华,王鑫洋,等. 微波加热再生沥青混合料技术性能研究[J]. 中国工程机械学报,2024,22(5):662-666.
- [13] 陈良锐,尹晓桐. 基于不同纤维改性的 OGFC-13 沥青混合料路用性能研究[J]. 工程建设,2024,56(1):57-61.
- [14] 王宏,李刚,王崇涛. 寒区低温环境下泡沫沥青冷再生混合料性能研究[J]. 冰川冻土,2024,46(5):1652-1665.
- [15] 胡贵华,欧阳剑,周基,等. 再生剂对乳化沥青冷再生混合料性能影响的试验研究[J]. 公路交通科技,2024,41(10):65-72.
- [16] 陈飞,李先延,高家贵,等. 温拌环氧沥青超薄加铺层层间粘结性能试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2025,58(2):230-238.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 公路沥青路面再生技术规范:JTG/T 5521—2019[S]. 北京:人民交通出版社,2019.
- [18] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程集料试验规程:JTG3432—2024[S]. 北京:人民交通出版社,2024.
- [19] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTGE 20—2011[S]. 北京:人民交通出版社,2011.
- [20] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基路面现场测试规程:JTG 3450—2019[S]. 北京:人民交通出版社,2019.