

改性沥青磨耗层性能及施工研究

傅星恺

(上海同舟智慧交通科技有限公司, 上海市 200092)

摘要: 依托福建省尤溪县洋中镇洋桂线(X731)路面品质提升工程, 针对当地环境气候和旅游景区快速开放交通的需求, 开展了改性沥青超薄磨耗层性能及施工工艺的研究。首先, 通过马歇尔试验确定了玄武岩纤维最佳掺量为沥青混合料质量的0.20%; 然后, 将废轮胎橡胶粉分别以5%、7%、9%、11%的掺量掺入混合料并进行路用性能试验。试验结果显示: 混合料高温稳定性随着橡胶粉掺量的增加而增强, 但当掺量大于9%后, 混合料低温抗裂性和水稳定性呈现下降趋势; 玄武岩纤维与橡胶粉的协同作用可提升混合料性能。在性能试验的基础上, 采用SBS改性非乳化不粘轮粘层油施工工艺进行试验段的铺筑, 检测结果显示, 试验段各项指标均符合规范要求, 说明该施工工艺能有效控制层间温度, 保证结构层结合质量, 提升道路整体性。

关键词: 沥青超薄磨耗层; 玄武岩纤维; 废轮胎橡胶粉; 非乳化不粘轮黏层油

中图分类号: U414; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)11-0301-05

Research on Performance and Construction of Modified Asphalt Wear Layer

FU Xingkai

(Shanghai Tongzhou Intelligent Transportation Technology Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the pavement quality improvement project of Yanggui Line (X731) in Yangzhong Town, Youxi County, Fujian Province, the performance and construction technology of modified asphalt ultra-thin wear layer are studied in response to the local environmental climate and the demand for rapid traffic opening in tourist attractions. Firstly, the Marshall test is carried out to determine that the optimal dosage of basalt fiber is 0.20% of the mass of asphalt mixture, and then, the waste tire rubber powder is added into the mixture at dosages of 5%, 7%, 9% and 11% respectively, and the pavement performance tests are conducted. The experimental results show that the high-temperature stability of the mixture increases with the increase of rubber powder content, but when the content exceeds 9%, the low-temperature crack resistance and water stability of the mixture show a decreasing trend. And the synergistic effect of basalt fiber and rubber powder can enhance the performance of the mixture. On the basis of performance testing, the independently developed SBS modified non-emulsified non-stick wheel adhesive layer oil construction process is used for the paving of the test section. The test results show that all indicators of the test section meet the specification requirements, indicating that the construction process can effectively control the interlayer temperature, ensure the bonding quality of structural layer, and improve the road integrity.

Keywords: asphalt ultra-thin wear layer; basalt fiber; waste tire rubber powder; non-emulsified non-stick wheel adhesive layer oil

0 引言

随着我国经济的快速发展, 大量道路面临着交通流量剧增和车辆荷载加重的严峻挑战。车辙、裂缝等早期病害频发, 不仅降低了道路服务水平, 还可能导致严重的安全隐患^[1-2]。

本文依托福建省尤溪县洋中镇洋桂线(X731)路面品质提升工程, 通过现场调研与评估, 决定采用改

性沥青超薄磨耗层对原保存良好的水泥混凝土路面进行“白改黑”加铺改造^[3-4]。相关研究^[5-6]表明, 沥青超薄磨耗层是一种有效的路面养护和改造措施, 能有效修复路面病害、提升路面性能, 并在道路工程领域得到了广泛应用。近年来, 有研究人员^[7-9]将废轮胎橡胶粉作为外掺材料加入沥青超薄磨耗层, 以增加其路用性能, 并取得了较好的实际应用效果。但因该工程受当地环境气候因素等影响, 对沥青超薄磨耗层的性能和环保要求更高。通过前期研究发现, 玄武岩纤维是一种性能优异的材料, 它具有高强度, 能够承受较大的外力而不易断裂; 高模量则使其

收稿日期: 2025-04-04

作者简介: 傅星恺(1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事道路工程设计及道路工程材料研究工作。

在受力时变形较小,保持结构的稳定性^[10],并且还耐高温,能在炎热的夏季,路面温度升高时,依然保持良好的性能^[11]。因此,本文拟通过玄武岩纤维和废轮胎橡胶粉二者的复合使用,研究其对沥青超薄磨耗层的影响。此外,因该工程所在地为旅游景区,对快速开放交通有较大的需要,为解决这一问题,该工程采用非乳化不黏轮黏层油施工工艺进行了试验段铺筑。

1 原材料

1.1 沥青

基质沥青选用上海石化生产的 70#道路沥青,其技术指标见表 1。

表 1 基质沥青技术指标

检测项目	检测结果	规范标准
针入度(25℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	64.7	60~80
软化点/℃	46.5	≥46
闪点/℃	>300	≥260
密度(25℃)/(g·cm ⁻³)	1.058	
15℃延度(5 cm/min)	>100	≥100

1.2 玄武岩纤维

试验采用长度为 6 mm 的玄武岩纤维,其化学稳定性良好,在沥青混合料的高温拌和及长期使用过程中,不易与其他物质发生化学反应,能始终保持自身的物理化学性能^[12]。同时,还具备良好的分散性,在沥青混合料搅拌过程中,能够均匀地分散在沥青与集料之间。

玄武岩纤维性能指标见表 2。

表 2 玄武岩纤维性能指标

检测项目	检测结果
单纤维直径/μm	15
密度/(g·cm ⁻³)	2.65
弹性模量/GPa	92
抗拉强度/MPa	3245
吸水性/%	0.14

1.3 废轮胎橡胶粉

废轮胎橡胶粉选用由废旧轮胎通过常温粉碎加工获得的 425 μm 橡胶粉。橡胶粉的拉伸强度和扯断伸长率能保证其在沥青中的分散性以及与沥青之间的有效相互作用^[13]。

废轮胎橡胶粉性能指标见表 3。

1.4 集料

粗集料选用具有低压碎值和磨耗损失的花岗岩,以保证磨耗层的强度和稳定性^[14]。细集料选用

表 3 废轮胎橡胶粉性能指标

检测项目	检测结果	技术要求
密度/(g·cm ⁻³)	1.17	1.05~1.25
金属含量/%	0.03	<0.05
纤维含量/%	0.61	<1.0
橡胶烃含量/%	52.64	≥42
水分/%	0.3	≤1.0
灰分/%	6.7	≤8

机制砂,以提高混合料的密实度和工作性。矿粉选用由石灰岩磨细而成的石灰石粉。

粗细集料技术指标见表 4、表 5。

表 4 粗集料技术指标

集料	表观密度/(g·cm ⁻³)	压碎值/%	洛杉矶磨耗值/%	吸水率/%
花岗岩	2.754	11.2	11.5	1.02

表 5 细集料技术指标

集料	表观密度/(g·cm ⁻³)	坚固性(>0.3 mm)/%	含泥量/%	吸水率/%
混合砂	2.631	7.1	1.21	0.84

1.5 非乳化不黏轮黏层油

该工程采用 SBS 改性非乳化不黏轮黏层油,其性能指标见表 6。

表 6 非乳化不黏轮黏层油性能指标

检测项目	检测结果	试验方法
60℃动力黏度/(Pa·s)	2.15	T0625—2011
软化点/℃	98.5	T0606—2011
25℃弹性恢复率/%	91	T0662—2000
25℃成膜时间/min	8.5	GB/T-16777
90°剥离强度/(N·mm ⁻¹)	3.2	ASTM-D903

2 配合比设计

2.1 级配设计

本次级配设计采用 S 型级配曲线作为初始级配。对粗集料、细集料和矿粉的比例进行调整,通过试拌,观察混合料的和易性、压实效果等,并检测其相关性能,确定最终集料级配。

改性沥青超薄磨耗层级配设计见表 7。

2.2 玄武岩纤维掺量

本次研究将玄武岩纤维掺量设置成 4 档,分别为沥青混合料质量的 0.10%、0.15%、0.20%、0.25%,通过马歇尔试验来确定其最佳掺量。

不同玄武岩纤维掺量下的马歇尔试验结果见表 8。

由表 8 可知,当玄武岩纤维掺量为 0.20% 时,混合料的稳定度、流值、空隙率等指标达到了最佳平衡。在该掺量下,混合料有较高的稳定度,能有效承

表 7 改性沥青超薄磨耗层级配设计

项目	各筛孔通过百分率/%							
	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
合成级配	100	79.6	58.2	46.4	31.3	20.6	16.3	9.1
级配上限	100	85	65	50	40	30	22	12
级配下限	100	75	50	35	25	18	12	8

表 8 不同玄武岩纤维掺量下的马歇尔试验结果

玄武岩纤维掺量/%	毛体积相对密度	稳定度/kN	流值/mm	空隙率/%	饱和度/%	矿料间隙率/%
0.10	2.453	8.52	2.51	4.23	68.5	12.5
0.15	2.461	9.11	2.68	3.97	70.3	12.0
0.20	2.486	9.87	2.83	3.88	73.1	11.8
0.25	2.521	10.52	3.04	3.51	76.5	11.2

受车辆荷载,且空隙率、矿料间隙率适中,保证了良好的排水性能和结构稳定性。同时,合适的饱和度和毛体积相对密度表明此时沥青与矿料之间的比例较为合理,既能保证混合料的耐久性,又能使其维持较好的高温稳定性和低温抗裂性。

3 路用性能试验

在确定最终集料级配和玄武岩纤维最佳掺量为 0.20% 后,改变废轮胎橡胶粉掺量,分别设置为沥青质量的 5%、7%、9%、11%,并对不同橡胶粉掺量的混合料进行路用性能试验。

3.1 高温稳定性试验

采用车辙试验测试沥青混合料的高温稳定性。按试验规程制作试件,试验温度设定为 60℃,轮压设置为 0.7 MPa,加载时间设置为 60 min。

不同橡胶粉掺量下的混合料高温车辙试验结果见图 1。

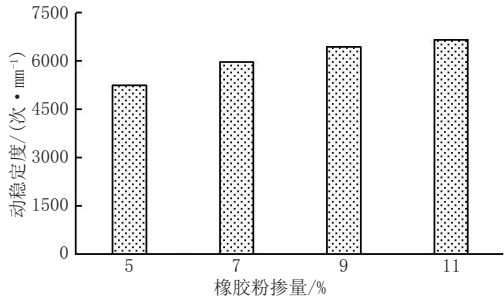


图 1 不同橡胶粉掺量下的混合料高温车辙试验结果

由图 1 可知,随着橡胶粉掺量的增加,混合料抵抗高温变形的能力逐步增强。原因是橡胶粉的掺入可使沥青混合料的内部结构发生变化,橡胶粉与沥青、集料之间的结合更加紧密。其高弹性和高韧性在高温下得到充分发挥,有效阻碍了沥青的流动和集料的位移。同时,在高温环境下,玄武岩纤维的高

弹性模量可使混合料内部形成稳定的骨架结构,约束集料的位移,分担车辆荷载产生的应力,进一步提升混合料整体的抗变形能力。玄武岩纤维与橡胶粉的协同作用,使得混合料动稳定度不断提高。

3.2 低温抗裂性试验

采用低温弯曲试验测定沥青混合料的破坏应变。按试验规程进行试验,将制备好的小梁试件在 -10℃ 条件下保温 4 h 后,以加载速率为 50 mm/min 进行试验。

不同橡胶粉掺量下的混合料低温弯曲试验结果见图 2。

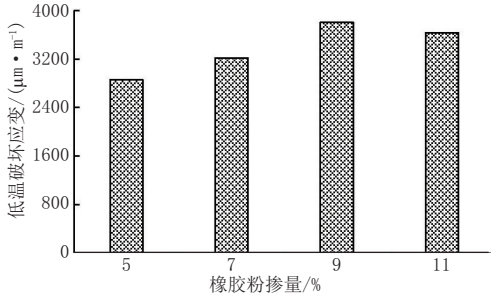


图 2 不同橡胶粉掺量下的混合料低温弯曲试验结果

由图 2 可知,混合料的低温破坏应变随着橡胶粉的掺入呈现出先上升后降低趋势。这是因为橡胶粉凭借良好的弹性和柔韧性,在掺量提升时增强了混合料柔韧性,使其能更好地适应温度变化带来的体积收缩,缓解内部应力,避免裂缝产生。而玄武岩纤维具有较高的抗拉强度,在低温环境下,能有效抵抗混合料因收缩产生的拉应力,阻止裂缝的扩展。当橡胶粉掺量大于 9% 后,低温破坏应变逐渐降低,除了沥青中极性组分相对含量降低等原因外,过量橡胶粉可能会影响玄武岩纤维在混合料中的均匀分布,削弱其增强效果,导致混合料低温抗裂性能下降。

3.3 水稳定性试验

采用浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验来评估混合料的水稳定性。按试验规程进行试验,得到不同橡胶粉掺量下的混合料水稳定性试验结果,见表 9。

由表 9 可知,橡胶粉掺量的增加可以在一定程度上提升混合料抵抗水损害的能力。这是因为冻融循环时,橡胶粉能吸收和缓冲水分冻结融化产生的应

表 9 不同橡胶粉掺量下的混合料水稳定性试验结果

橡胶粉掺量/%	浸水残留稳定度/%	冻融劈裂抗拉强度比/%
5	84.14	82.03
7	87.65	85.34
9	91.13	90.62
11	88.35	87.47

力,防止混合料产生裂缝和松散。同时,玄武岩纤维化学稳定性良好,在潮湿环境中不易被侵蚀,能稳定地存在于混合料内,增强混合料内部结构的稳定性,还能提高沥青与集料的黏结力,使得水分更难侵入并破坏沥青与集料的界面。但当橡胶粉掺量大于 9% 后,混合料浸水残留稳定度和冻融劈裂抗拉强度比呈现降低趋势,原因除了过量橡胶粉会导致沥青与集料的界面弱化外,还会干扰玄武岩纤维与沥青、集料的协同作用,降低整体的水稳定性能。

综上所述,本次改性沥青超薄磨耗层材料的最佳配合比为:玄武岩纤维掺量为沥青混合料质量的 0.20%,废轮胎橡胶粉掺量为沥青质量的 9%。在此配合比下,混合料在高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性方面达到较好的平衡,能满足工程实际需求。

4 非乳化不黏轮黏层油施工工艺及试验段铺筑

4.1 非乳化不黏轮黏层油施工流程图

为实现该工程道路的快速通车,本次研究采用了非乳化不黏轮黏层油施工工艺,并进行了试验段的铺筑。

非乳化不黏轮黏层油施工流程图见图 3。

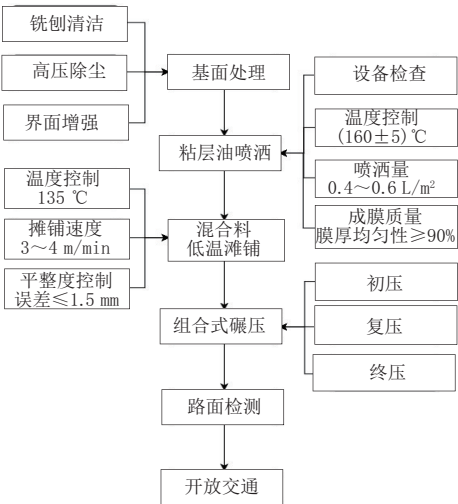


图 3 非乳化不黏轮黏层油施工流程图

4.2 试验段铺筑

按图 3 所示流程进行试验段铺筑。

施工前对路面基层进行全面清理,使用清扫车与路面吹风机配合人工清扫,去除杂物、灰尘和松散

颗粒,确保基层表面干燥、洁净。采用智能沥青洒布车进行非乳化不黏轮黏层油的喷洒作业。喷洒前检查喷洒设备,保证其正常运转,校准计量装置,保证黏层油喷洒量精确。根据之前的试验,喷洒量设置为 0.4~0.6 L/m²;调整洒布车的行驶速度、喷嘴压力和间距。在喷洒过程中,洒布车保持匀速行驶,确保黏层油均匀覆盖路面,避免出现漏洒、重叠现象。对于路缘石、检查井等部位,采用人工补洒,保证黏结效果。混合料摊铺时出料温度控制在 135 ℃,摊铺速度应与黏层油成膜时间相匹配,控制在 3~4 m/min。采用 3 m 直尺法对平整度进行检测,摊铺厚度误差应控制在不大于 1.5 mm。摊铺完成后继续碾压施工,具体操作要求见表 10。图 4 为试验段现场施工图。

表 10 碾压施工要求

碾压阶段	设备及要求
初压	以 2 km/h 的速度,用双钢轮压路机静压 2 遍
复压	以 3 km/h 的速度,用胶轮压路机揉压 3 遍
终压	以频率 45 Hz,用双钢轮压路机振压 1 遍



(a) 现场施工一



(b) 现场施工二

图 4 试验段现场施工图

4.3 试验段检测

施工完成后,使用红外热像仪、摆式摩擦仪、钻芯取样等对试验路段进行检测评估,结果见表 11。

由表 11 可知,采用非乳化不黏轮黏层油快干技术可以有效控制层间温度在不大于 50 ℃ 范围内,有助于保证各结构层之间的结合质量。玄武岩纤维与

表 11 试验段检测结果

检测项目	检测结果	技术要求
30 min 层间温度	48 ℃	≤50 ℃
摩擦系数 BPN	平均值 69.3	≥55
层间黏结强度	平均值 864 kPa	≥600 kPa
压实度	平均值 93.7%	≥92%
空隙率	平均值 3.95%	3%~5%

橡胶粉复合改性能显著提升层间黏结强度,使道路结构的整体性增强,能更好地承受车辆荷载和自然因素的作用。试验结果表明,该试验段各项检测指标均符合《公路工程质量检验评定标准》(JTG F80/1—2004)要求。

5 结 语

(1)玄武岩纤维与废轮胎橡胶粉复合改性可显著提升沥青超薄磨耗层的综合性能。通过试验验证,玄武岩纤维最佳掺量为沥青混合料质量的 0.20%,废轮胎橡胶粉最佳掺量为沥青质量的 9%。在此配合比下,混合料的高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性达到最优平衡。

(2)废轮胎橡胶粉掺量对混合料性能影响显著。混合料高温稳定性随着橡胶粉掺量的增加而增强,但当橡胶粉掺量大于 9% 后,混合料低温抗裂性和水稳定性因沥青与集料界面弱化及纤维分散不均而下降。

(3)玄武岩纤维与橡胶粉存在协同效应。纤维的高模量骨架与橡胶粉的高弹性共同抑制混合料的高温变形;纤维的抗拉强度与橡胶粉的柔韧性协同提升混合料的低温抗裂性;二者的化学稳定性与吸能特性协同增强混合料的水稳定性。

(4)非乳化不黏轮黏层油施工工艺通过控制喷

洒量为 0.4~0.6 L/m²、摊铺速度为 3~4 m/min,可有效保证层间黏结强度和结构整体性,满足快速开放交通需求。

(5)试验段检测结果表明,在推荐配合比和工艺参数下,混合料压实度为 93.7%、空隙率为 3.95%,各项检测指标均符合规范要求,可为同类工程提供直接技术指导。

参考文献:

[1] 朱成元. 沥青混凝土路面常见病害及养护施工技术研究[J]. 科学技术创新, 2023(19): 101-104.

[2] 童巨声. 沥青路面车辙与表面裂缝机理分析与预估研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.

[3] 秦慧敏. 高速公路水泥混凝土路面“白改黑”设计与应用[J]. 公路, 2024, 69(11): 76-81.

[4] 陈晔. 水泥混凝土路面拓宽改造工程“白改黑”策略及工程实践[J]. 四川水泥, 2024(11): 261-265.

[5] 李响, 廖嘉欣, 曾叶青, 等. 市政道路沥青路面超薄磨耗层配合比优化及施工技术分析[J]. 四川水泥, 2024(10): 232-234.

[6] 陈娥梅, 闵建刚, 李红顺, 等. 超薄磨耗层混合料设计及施工关键技术研究[J]. 城市道桥与防洪, 2024(2): 140-144.

[7] 冯志强. 超薄磨耗层温拌橡胶沥青混合料性能研究[J]. 公路, 2021, 66(11): 14-20.

[8] 李瑞娜. 橡胶改性沥青 SMA 超薄磨耗层路用性能分析[J]. 山东交通科技, 2021(2): 34-36.

[9] 周礼. 高黏结超薄磨耗层罩面技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.

[10] 覃潇, 申爱琴, 郭寅川. 基于关联性的玄武岩纤维沥青胶浆及其混合料性能研究[J]. 材料导报, 2016, 30(12): 124-128; 152.

[11] 苗世坦, 刘嘉麒, 郭玲, 等. 高温处理对玄武岩纤维抗拉强度和结构的影响[J]. 材料导报, 2024, 38(11): 156-161.

[12] 黄杰超, 陈洪科. 玄武岩纤维长度对混凝土力学性能和抗冻性能的影响[J]. 功能材料, 2025, 56(3): 3194-3201.

[13] 张超. 不同加载模式下橡胶沥青混合料强度及疲劳特性统一表征[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.

[14] 蒋睿, 谢永江, 翁智财, 等. 高压碎值骨料的理化特性对混凝土力学性能的影响[J]. 铁道建筑, 2025, 65(1): 147-153.