

基于加速加载试验的超薄罩面耐久性能研究

路 斌¹, 段丹军², 张 帅¹, 裴 强¹

(1. 山西路安交通科技有限公司, 山西 太原 030032;

2. 山西省交通科技研发有限公司, 山西 太原 030032)

摘要:为研究超薄罩面(Ultra-Thin Overlay, UTO)耐久性能的衰变规律,采用传统抗滑指标与激光扫描、数字图像处理相结合的方法,通过路面加速加载试验设备对不同高黏沥青制备的超薄罩面试件展开测试。结果表明:在100万次的加载试验期间,3种超薄罩面试件的摆值和平均构造深度均呈现“先快速下降、后逐渐稳定”的变化趋势;在同一级配下,高黏改性沥青60℃动力黏度越大,由其制备的超薄罩面耐久性越好;相较于UTO-B和UTO-C,UTO-A的磨耗面积比更小,耐磨耗性能更强;磨耗面积比与摆值、平均构造深度的多项式拟合相关系数均大于0.85,相关性良好。该结论可为超薄罩面抗滑与磨耗性能评价指标的完善与发展提供一定支持和参考。

关键词:道路工程;超薄罩面;加速加载试验;耐久性能

中图分类号: U416.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2026)02-0066-07

作为高等级公路预防性养护措施,超薄罩面近年来发展迅速,因其具有抗滑耐磨、行车噪声低、施工速度快等优势,在改扩建路面、桥面铺装、隧道铺装等场景得到广泛应用^[1-3]。但是,超薄罩面在服役过程中遭受行车荷载的长期作用,路面纹理及构造被不断磨耗,路面抗滑性能下降,路用性能衰减,严重影响道路行车安全。因此,针对超薄罩面路用耐久性能衰变规律的研究显得尤为重要。

目前,关于沥青路面路用性能集中在高温、低温、水损、疲劳等研究^[4-5],而耐久性能更加关注抗滑和磨耗研究,利用加速磨耗设备进行加速加载试验,模拟复杂环境下重载车辆对路面的作用,快速实现对路面结构、材料长期性能的评价^[6-10]。近年来,大量学者围绕沥青路面在长期服役期间性能下降的相关评价指标展开大量研究。通过构造深度试验和摆值试验采集路面数据,分析构造深度与摆值随着加载次数的变化规律,建立沥青路面抗滑性能预测模型^[11-14];通过传统抗滑性能测试方法并结合激光轮廓测量技术,开展沥青路面抗滑性能衰变规律研究^[15];采用数字图像处理技术与算法重构路面纹理图像,揭示路面纹理变化趋势,分析路面纹理磨损过程^[16]。

本文基于加速加载试验,采用传统抗滑指标与激光扫描、数字图像处理相结合的方法,探究超薄罩面在不同加载次数下抗滑与磨耗性能的衰变规律,进行不同指标之间的相关性分析,横向对比不同材料的性能优劣,以期完善超薄罩面抗滑与磨耗性能的评价体系。

1 试验材料

1.1 高黏改性沥青

选取3种高黏改性沥青A、B、C作为研究对象,材料主要成分包括胶粉和SBS改性剂,具体种类与掺量如表1所示,常规性能如表2所示。

收稿日期:2026-03-23 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxxbzrb.20260055

基金项目:山西省科技重大专项计划项目(202201090301014);山西省基础研究计划联合资助项目(202503011222007);山西省青年科学基金项目(202303021222388);山西交通控股集团有限公司科技创新项目(24-JKKJ-6)

作者简介:路斌(1998—),男,工程师,研究方向为交通运输工程。E-mail: 289812834@qq.com

路斌,段丹军,张帅,等.基于加速加载试验的超薄罩面耐久性能研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2026,39(2):66-72.

表 1 高黏改性沥青材料成分

材料成分	胶粉种类/目	胶粉掺量/%	SBS 种类	SBS 掺量/%
沥青 A	30	10	星型	8
沥青 B	30	10	线型	8
沥青 C	30	10	线型	6

表 2 高黏改性沥青常规性能

材料成分	针入度/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	5℃延度/ cm	25℃弹性恢复/ %	180℃旋转黏度/ (Pa·s)	60℃动力黏度/ (Pa·s)
沥青 A	47.2	100.3	30.6	99.5	2.8	372 508
沥青 B	45.0	98.1	25.3	97.5	2.5	204 235
沥青 C	41.1	95.9	23.8	99.2	2.2	152 450

1.2 沥青混合料

选取 SMA-10 级配作为超薄罩面沥青混合料的级配类型,将 3 种高黏改性沥青分别制备相应的混合料试件,SMA-10 沥青混合料设计级配如表 3 所示。通过马歇尔试验确定 3 种高黏改性沥青的最佳油石比分别为 6.9%、6.8%、6.8%。其中粗、细集料均采用辉绿岩,填料采用石灰岩矿粉,纤维采用玄武岩纤维,用量为沥青混合料质量的 0.3%,各项技术指标均满足 JTG F40—2023《公路沥青路面施工技术规范》。3 种超薄罩面混合料的路用性能如表 4 所示。

表 3 SMA-10 沥青混合料设计级配

SMA-10	通过不同尺寸筛孔质量百分率/%								
	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
级配上限	100	100	60	32	26	22	18	16	13
级配下限	100	90	28	20	14	12	10	9	8
级配中值	100	95	44	26	20	17	14	12	10
设计级配	100	93.8	46.8	27.3	19.2	15.5	13.1	11.8	9.6

表 4 超薄罩面混合料路用性能

材料成分	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	最大弯拉应变/με	马歇尔残留稳定度/%
沥青 A	9 513	4 883	90
沥青 B	8 170	4 165	91
沥青 C	6 211	3 511	88

2 试验方法

2.1 加速加载试验

采用 PAVE MLS11 小型路面加速加载试验设备(如图 1 所示),可实现在较短的时间内加速模拟超薄罩面在设计使用期内受到实际车辆荷载作用的磨损效果,设备有效加载长度为 1.1 m,加载宽度为 0.08 m,最大加载速度为 7 000 次/h,轮胎接地压强为 0.7 MPa,最大轮载为 2.7 kN。加速加载试验方案:设置 5 万次、10 万次、15 万次、20 万次、30 万次、40 万次、50 万次、60 万次、80 万次和 100 万次共计 10 个加载等级,在每个加载等级完成之后,取出试件进行测试。

超薄罩面加速加载试件采用“50 mm 水泥混凝土 + SBS 改性乳化沥青 + 20 mm 超薄罩面”加铺设



图 1 小型路面加速加载试验设备

计,具体制备方法:①通过 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 模具制备 50 mm 水泥混凝土底座;②拆模后将水泥底座放置于 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 模具中;③按照最佳洒布量在底座表面均匀喷洒 SBS 改性乳化沥青作为黏层油;④加铺 20 mm 超薄罩面混合料成型复合板试件。对成型好的复合板试件由上至下钻取圆柱体芯样,并沿着芯样两侧分别切割 22.5 mm ,此时试件尺寸可满足加速加载试验设备的需求,试件制备示意如图 2 所示。

2.2 摆值试验

采用摆式摩擦仪对试件表面进行摆值测试,由于单个试件在加载方向上的长度仅为 10.5 cm ,小于规范要求的校核滑动长度 12.6 cm ,直接测试会导致试验出现较大误差,因此在测试时将 2 个试件并排放置,保证测试区域的整体性与一致性,每个测点取 5 次平均值作为试验结果。

2.3 构造深度试验

由于加速加载试件的特殊尺寸无法满足传统手工铺砂法对构造深度的测试要求,因此,优化构造深度测试方法,采用手持式路面激光扫描仪对试件表面进行激光扫描,选取平均构造深度(MTD)作为评价指标,该指标是指在测试范围内轮廓各点到轮廓峰顶线距离总和的算术平均值,该设备可直接获取干燥路表纹理数字化高程信息,检测精度高、覆盖范围广、重构造效果好,扫描结果准确、直观、形象,被广泛用于路面纹理形貌测量,可有效评价超薄罩面抗滑性能。

由于加速加载试件的特殊尺寸无法满足传统手工铺砂法对构造深度的测试要求,因此,优化构造深度测试方法,采用手持式路面激光扫描仪对试件表面进行激光扫描,选取平均构造深度(MTD)作为评价指标,该指标是指在测试范围内轮廓各点到轮廓峰顶线距离总和的算术平均值,该设备可直接获取干燥路表纹理数字化高程信息,检测精度高、覆盖范围广、重构造效果好,扫描结果准确、直观、形象,被广泛用于路面纹理形貌测量,可有效评价超薄罩面抗滑性能。

2.4 数字图像处理

采用专业拍摄设备对超薄罩面加速加载试件表面进行图像采集,采集期间保持环境光线、采集高度一致,通过 ImageJ 数字图像处理软件,将采集图像转化为 8 bit 灰度图片,同时对灰度图做均衡化处理,然后使用中值滤波和高通滤波对图像进行平滑锐化处理。调节阈值,将整个轮碾区域分割为已磨耗区域和未磨耗区域,对已磨耗区域形状进行识别提取,计算已磨耗区域面积与整个轮碾区域面积的比值,即磨耗面积比,该指标可评价超薄罩面在不同加载次数下的磨耗性能变化情况。

3 结果与讨论

3.1 抗滑性能

3 种超薄罩面摆值测试结果如图 3 所示,平均构造深度测试结果如图 4 所示。

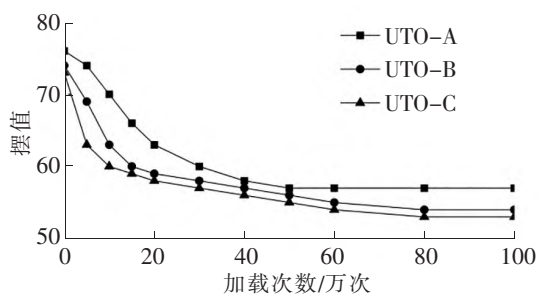


图 3 摆值测试结果

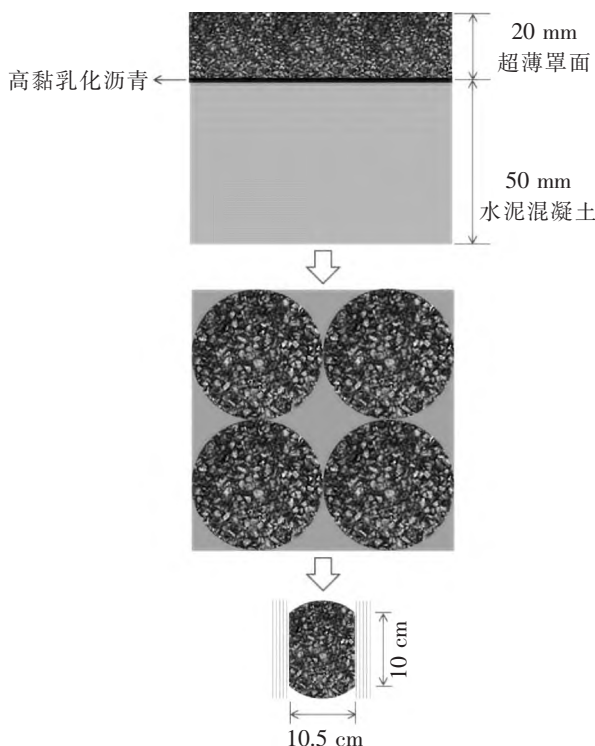


图 2 试件制备示意图

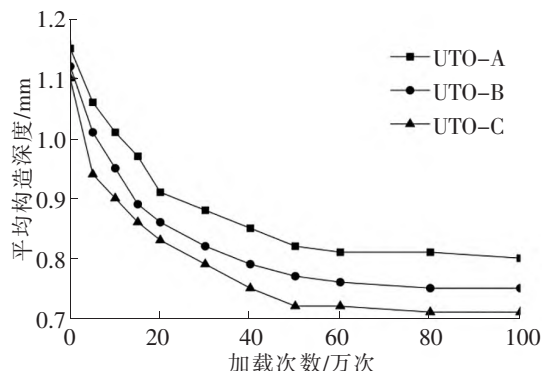


图 4 平均构造深度测试结果

由图 3、图 4 可知,3 种超薄罩面的摆值与平均构造深度初始值接近,摆值范围在 73~76 区间,平均构造深度范围在 1.10~1.15 区间,这是因为在同一级配下,高黏改性沥青不会影响沥青混合料表面的纹理构造,该级配下的超薄罩面具有良好的抗滑性能。

随着加载次数的不断增加,摆值与平均构造深度均呈现“先快速下降、后逐渐稳定”的变化趋势,其中在 0~20 万次下降较快,20 万~50 万次下降较慢,50 万~100 万次趋于稳定。加载 100 万次后,3 种超薄罩面的构造深度均大于 0.55 mm,UTO-A 的摆值大于 55,UTO-B 与 UTO-C 的摆值小于 55。综合来看,3 种超薄罩面在抗滑耐久性能方面的优劣顺序为 UTO-A>UTO-B>UTO-C。

分析认为,高黏改性沥青 A 内部形成致密稳固的三维交联体系,该结构从根本上改变了沥青的力学行为,使其宏观性能得到显著提升。其中,60 ℃动力黏度指标提升明显,导致沥青与集料的黏结效果更好,在抗滑耐久方面表现更佳。

通过 ORIGIN 软件对上述测试结果进行拟合分析,采用 Boltzmann 建立 3 种超薄罩面抗滑性能衰变模型,该模型相关系数均大于 0.9,表明相关性良好,模型结果如表 5、表 6 所示。

表 5 超薄罩面摆值衰变模型

材料类型	摆值	R^2	调整后 R^2
UTO-A	$Y = 57.01 + 25.08 / (1 + e^{(x - 10.51) / 8.67})$	0.997 8	0.996 8
UTO-B	$Y = 54.87 + 33\ 376.71 / (1 + e^{(x + 98.64) / 13.22})$	0.981 4	0.973 4
UTO-C	$Y = 54.50 + 113\ 105.14 / (1 + e^{(x + 85.95) / 9.79})$	0.949 4	0.927 7

表 6 超薄罩面平均构造深度衰变模型

材料类型	平均构造深度	R^2	调整后 R^2
UTO-A	$Y = 0.80 + 105.19 / (1 + e^{(x + 110.95) / 19.43})$	0.996 1	0.994 5
UTO-B	$Y = 0.75 + 453.61 / (1 + e^{(x + 117.24) / 16.43})$	0.997 7	0.996 7
UTO-C	$Y = 0.71 + 1\ 065.97 / (1 + e^{(x + 128.42) / 16.08})$	0.980 5	0.972 2

3.2 磨耗性能

经 ImageJ 数字图像处理软件处理分析,3 种超薄罩面表面磨耗面积变化如图 5~图 7 所示,磨耗面积比测试结果如图 8 所示。

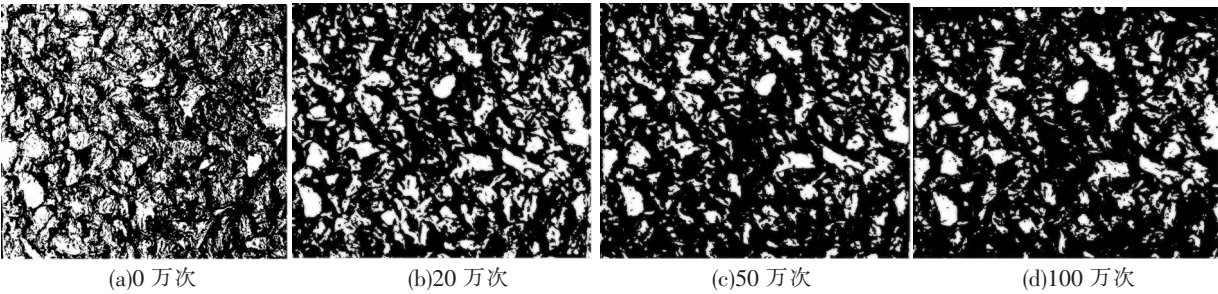


图 5 UTO-A 磨耗面积变化

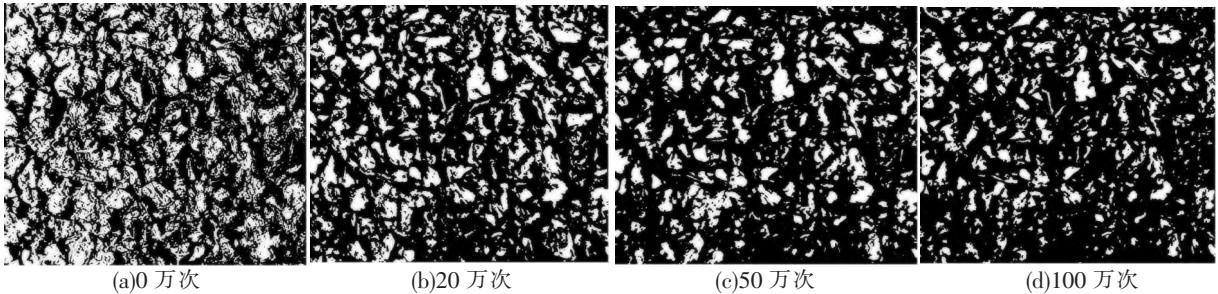


图 6 UTO-B 磨耗面积变化

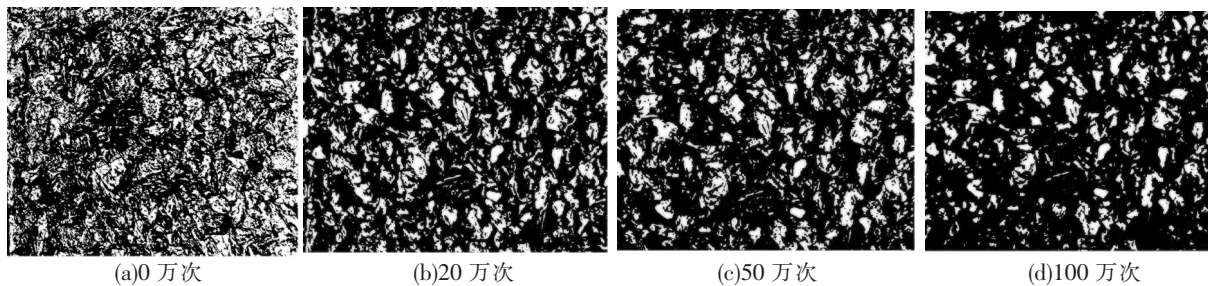


图 7 UTO-C 磨耗面积变化

由图 5~图 7 可知,随着加载次数的持续增加,3 种超薄罩面混合料试件表面形貌特征变化基本一致,其中白色部分代表超薄罩面的未磨耗区域,该区域保留较丰富的路面纹理和抗滑性能;反之,黑色部分代表超薄罩面的已磨耗区域,该区域的路面纹理丧失,抗滑性能较差。加载 0~20 万次期间,在试验轮荷载及摩擦作用下,试件表面的沥青出现疲劳开裂,局部沥青膜发生脱落,导致裹覆的石料开始显露,试验轮轮迹带也随之产生;加载 20 万~50 万次期间,由于荷载的持续作用,试验轮与集料剧烈接触,沥青膜大量脱落,裹覆的石料不断显露,个别集料被不断揉搓开始掉落;加载 50 万~100 万次期间,部分区域集料逐渐被磨平、磨光,但是边缘沥青膜依然存在,试验轮轮迹带清晰可见,其中超薄罩面 B 和 C 在轮迹带区域内均出现约 1 mm 的沉陷;加载 50 万~100 万次期间,部分区域细小集料掉落填充在纹理内部,最终测得 UTO-B 和 UTO-C 在轮迹带区域内的竖向变形达 2 mm,相比之下,UTO-A 结构完整,无变形产生。

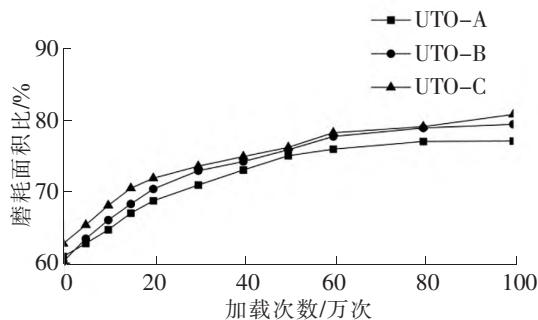


图 8 磨耗面积比测试结果

由图 8 可知,3 种超薄罩面磨耗面积比均呈现稳步上升的趋势,整体变化范围在 60%~80% 的区间,在加载 0 万次时,3 种超薄罩面磨耗面积比的初始值接近;在加载 100 万次后,UTO-A 的磨耗面积比小于 UTO-B 和 UTO-C,说明其耐磨耗性能更强,在长期加载过程中表现出更好的耐久性。

3.3 相关性分析

采用 ORIGIN 软件对 3 种超薄罩面磨耗面积比与摆值、磨耗面积比与平均构造深度的测试结果进行拟合分析,多项式拟合结果如图 9 所示。

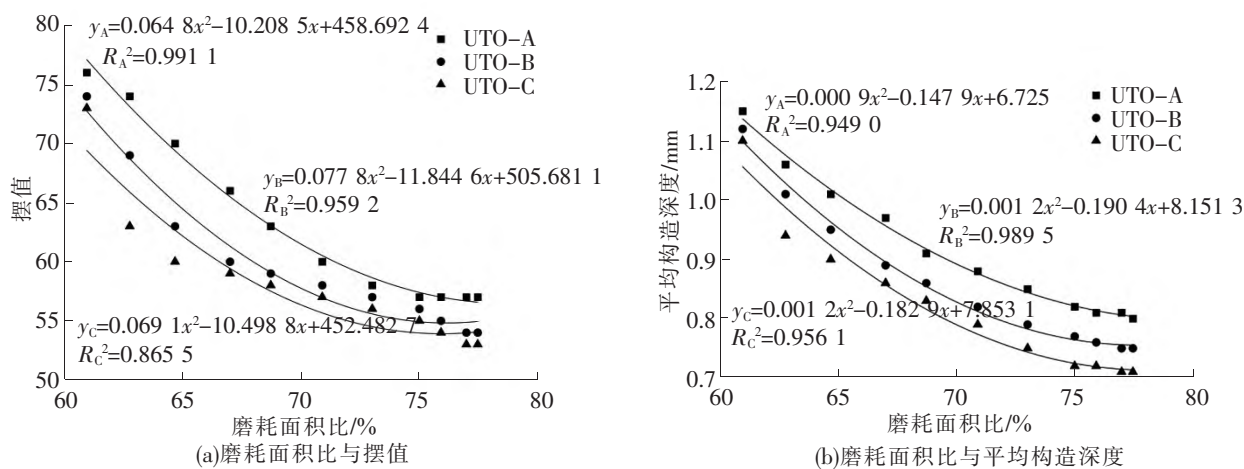


图 9 多项式拟合结果

由图 9 可知,超薄罩面表面磨损越严重,磨耗性能越差,抗滑性能也会相应下降。其中,3 种超薄罩面磨耗面积比与摆值的多项式拟合相关系数分别为 0.991 1、0.959 2、0.865 5,磨耗面积比与平均构造深度

的多项式拟合相关系数分别为 0.949 0、0.989 5、0.956 1,相关系数均大于 0.85,说明磨耗面积比与摆值、磨耗面积比与平均构造深度的相关性良好。

4 结论

本文基于加速加载试验对超薄罩面耐久性能展开研究,建立了合理高效的加载方案,提出超薄罩面加铺层结构设计方法,采用传统抗滑指标与激光扫描、数字图像处理相结合的方法,评价超薄罩面抗滑与磨耗性能的衰变规律,主要结论如下:

(1)3种超薄罩面的摆值与平均构造深度在加载过程中均呈现“先快速下降、后逐渐稳定”的变化趋势,在抗滑性能方面 UTO-A 表现更佳。这是由于其沥青 A 内部形成致密稳固的三维交联体系,该结构从根本上改变了沥青的力学行为,使其宏观性能得到显著提升,且 60℃动力黏度越大,超薄罩面耐久性越好。

(2)随着加载次数的持续增加,3种超薄罩面混合料试件表面形貌特征变化基本一致,且磨耗面积比均呈现稳步上升的趋势,整体变化范围在 60%~80%的区间,其中 UTO-A 磨耗面积比最小,耐磨耗性能最强,在长期加载过程中,结构完整且无变形产生,表现出更好的耐久性,可适用于重载交通、高温地区等工况。

(3)经 ORIGIN 软件拟合分析,3种超薄罩面磨耗面积比与摆值、磨耗面积比与平均构造深度的多项式拟合相关系数均大于 0.85,表明上述指标之间的相关性良好。在进行路面设计与施工时,需综合考虑磨耗性能与抗滑性能,从而更好地保障路面质量与安全。

参 考 文 献

- [1]虞将苗,杨倪坤,于华洋.道路高性能沥青超薄磨耗层技术研究与应用现状[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2287-2298.
- [2]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.
- [3]张苏豫,李俊辉,张增平,等.道路超薄磨耗层材料研究进展[J].化工新型材料,2025,53(6):222-229.
- [4]张晋媛.富油 RAP 热再生沥青混合料路用性能研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35(1):120-126.
- [5]王场.微藻油改性沥青混合料疲劳性能[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35(4):110-116.
- [6]马泽欣,刘黎萍,孙立军.基于加速加载的在役沥青混合料损伤与疲劳性能[J].吉林大学学报(工学版),2019,49(2):384-391.
- [7]刘震,顾兴宇,任华.基于 MLS66 加速加载试验的半刚性基层沥青路面力学响应分析[J].东南大学学报(自然科学版),2023,53(1):114-122.
- [8]韩振强,胡力群,沙爱民.基于路面加速加载的沥青路面疲劳损伤预估模型标定方法[J].交通运输工程学报,2023,23(4):258-270.
- [9]李骏,何超,刘震,等.基于多尺度加载试验的沥青路面结构参数设计方法[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2024,43(1):31-38.
- [10]郜鑫振,司春棣,凡涛涛,等.重载车辆不同行驶条件下沥青路面结构动态响应分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2023,36(1):48-53.
- [11]王春,郝培文,张喜艳.基于加速加载试验的温拌沥青混合料长期性能研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,36(5):860-868.
- [12]刘亚敏,汪磊,杨振.沥青路面抗滑性能衰减规律及预测模型[J].长安大学学报(自然科学版),2023,43(5):1-10.
- [13]马健萍,许新权,范倩,等.基于加速加载试验的 SMA-13 沥青混合料抗滑性能研究[J].公路,2022,67(7):388-394.
- [14]官志桃,何兆益,黄昭东,等.排水沥青路面抗滑性能衰变室内模拟研究[J].武汉大学学报(工学版),2025,58(6):903-912.
- [15]王海涛,沈平,高博.基于 MTLBO 和 ELM 的沥青路面抗滑性能预测[J].西南大学学报(自然科学版),2024,46(1):196-208.
- [16]李俊杰,颜峰,周彬.基于纹理特征的钢渣沥青路面抗滑性能测试与评价[J].材料导报,2024,38(增刊 1):315-321.

Study on the Durability Performance of Ultra-Thin Overlay Based on Accelerated Loading Test

LU Bin¹, DUAN Danjun², ZHANG Shuai¹, PEI Qiang¹

(1. Shanxi Highway Safety Transportation Technology Co. Ltd., Taiyuan 030032, China;

2. Shanxi Transportation Technology Research & Development Co. Ltd., Taiyuan 030032, China)

Abstract: To study the decay pattern of the durability performance of Ultra-Thin Overlay (UTO), a method combining traditional skid resistance indicators with laser scanning and digital image processing was employed to test Ultra-Thin Overlay specimens prepared with different high-viscosity asphalt using accelerated loading pavement test equipment. The results indicate that during one million loading cycles, all three types of Ultra-Thin Overlay specimens exhibit a trend in both BPN and MTD characterized by an initial rapid decline followed by gradual stabilization. At the same gradation, the higher the dynamic viscosity of high-viscosity modified asphalt at 60 °C, the better the durability of Ultra-Thin Overlay prepared from it. Compared to UTO-B and UTO-C, UTO-A exhibits a smaller wear area ratio and stronger wear resistance. The polynomial fitting correlation coefficients between wear area ratio and BPN as well as MTD are all greater than 0.85, demonstrating good correlation. These findings can provide support and reference for the improvement and development of skid resistance and wear performance evaluation indicators for Ultra-Thin Overlay.

Key words: road engineering; Ultra-Thin Overlay; accelerated loading test; durability performance

~~~~~

(上接第 65 页)

## Study on Strength Characteristics of Solid Waste Mixture in Dam Engineering

CAO Yingjian<sup>1</sup>, ZHANG Shaoxiong<sup>1,2</sup>, ZHANG Bo<sup>3</sup>, ZHANG Liting<sup>1,2</sup>, GENG Xinxin<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Road and Railway Engineering Safety Assurance, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. Hebei Water Conservancy Engineering Bureau Group Co. Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of resource utilization of tailings sand and fly ash, this paper took the two as the main raw materials to study the mechanical properties of solid waste mixture. Based on the analysis of the basic physical properties of the material, nine different ratio schemes were designed, and the unconfined compressive strength tests of 0, 3, 7 and 28 d were used to systematically study the influence of cement, lime and fly ash content on the strength evolution law. Through analysis and research, a new mixed material with tailings sand and fly ash as the main raw material was proposed for the use in road base and subbase structure layer. The results show that the 7 d strength of 2<sup>#</sup>, 4<sup>#</sup>, 5<sup>#</sup>, 6<sup>#</sup>, 7<sup>#</sup> ratio is 4.4, 3.2, 2.12, 1.52, 1.14 MPa, respectively. The strength of the mixture significantly increases with the extension of the age, and the cement content plays a leading role in the strength growth. The fly ash can optimize the structure and improve the later strength through the secondary hydration reaction, while the contribution of lime to the strength is relatively limited. The materials with different proportions show the mechanical characteristics of the transition from plasticity to brittleness. Based on the test results, a tailings sand-fly ash composite material system suitable for road base and subbase is proposed.

**Key words:** tailings sand; fly ash; unconfined compressive strength; road engineering