

沥青路面预防性养护技术的可持续抗滑性能评估

朱梅路

(广东能达公路养护股份有限公司, 广东 广州, 510000)

摘要: 长期交通载荷和外部环境因素作用会造成路面抗滑性能下降, 从而导致交通事故, 因此对路面抗滑性进行持续监测与评估具有重要意义。本研究通过室内试验, 收集了48组11个磨耗阶段的沥青路面结构和摩擦系数数据, 每个阶段包含2万次磨耗循环; 通过分析沥青路面纹理和摩擦系数指标的下降趋势, 建立了沥青路面抗滑性能劣化相关性拟合公式 ($R^2 = 0.9664$); 对磨耗后的车辙板试件分别采用同步砾石封层、微表处、薄层罩面、热再生4种路面养护技术, 进行了5个阶段的磨耗试验。通过与建立的路面抗滑劣化模型进行对比, 采用时间/路面状况分析方法确定了本研究磨耗试验条件下的最佳养护时机为23万次磨耗循环。对不同的养护技术进行养护效果分析, 得出SMA-5薄层罩面为最有效的养护方法。

关键词: 沥青路面; 预防性养护; 抗滑性能; 可持续性; 养护决策

中图分类号: U 416.217; U 418.6

文献标识码: A

Evaluation of Sustainable Skid Resistance of Asphalt Pavement Preventive Maintenance Techniques

ZHU Meilu

(GuangDong Long Da Superhighway Maintenance Co. Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong, China)

Abstract: Long-term traffic loads and external environmental factors will cause the decline of pavement skid resistance, which will lead to traffic accidents, therefore, continuous monitoring and evaluation of pavement skid resistance is of great significance for practical maintenance. 48 groups of asphalt pavement structure and friction coefficient data of 11 abrasion stages were collected through indoor tests, and each stage contained 20,000 abrasion cycles; by analyzing the decreasing trend of asphalt pavement texture and friction coefficient indexes, an asphalt pavement skid resistance deterioration model was established ($R^2 = 0.9664$); rutted plate specimens after abrasion were respectively treated with simultaneous gravel 4 types of pavement maintenance techniques, namely, sealing, micro-surface treatment, thin-layer overlay, and thermal regeneration, were used to conduct 5 stages of abrasion tests. By comparing with the established pavement skid resistance deterioration model, the optimal maintenance timing under the abrasion test conditions of this study was determined to be 230,000 abrasion cycles by using the time/pavement condition analysis method, and the maintenance effects of different maintenance techniques were analyzed, and it was concluded that the SMA-5 thin-layer overlay was the most effective maintenance method.

Key words: asphalt pavements; preventive maintenance; skid resistance; sustainability; maintenance decisions

随着我国重型车辆交通流量的增大, 道路服役性能劣化速度不断加快, 从而增加了道路安全事故发生的风险^[1]。因此, 需要对沥青路面的抗滑性进行评估和预测, 并及时采用预防性养护方

法, 提高道路的长期服役性能及交通安全。沥青路面服役性能随着时间延长会不断下降, 并在6~8年后迅速下降, 抗滑性能逐渐降低。沥青路面的磨耗可以分为沥青胶结料对集料表面的磨耗和

收稿日期: 2023-09-26

作者简介: 朱梅路, 工程师, 本科, 研究方向为高速公路养护维修

集料的磨耗，沥青混合料在初始阶段的压密变形使其抗滑性能迅速恶化^[2]。相比之下，后期阶段是一个渐进的过程，涉及集料的磨耗和碾磨，抗滑性的下降趋于稳定，因此，路面宏观结构的变化和压缩密度变形是影响沥青路面抗滑性能劣化的主要因素^[3]。尽管已有大量关于沥青路面抗滑性能劣化机理的研究，但路面抗滑性能劣化的影响因素较多，仍难以对其进行准确的评价。目前，研究路面抗滑劣化主要采用两种方法，一是收集和分析户外现场数据，此过程耗时耗力，且容易受到不可控因素的影响；二是利用室内加速加载磨耗装置模拟路面抗滑性能的劣化，采用车轮负载磨耗装置可以提供较为真实的轮胎-路面磨耗过程模拟。相关学者利用轮载磨耗试验设备进行了室内模拟，分析了不同磨耗条件下路面抗滑性的变化趋势，并阐明了其衰减规律^[4]。

PM（preventive maintenance，反应性养护）处理被广泛应用于缓解路面功能的劣化，优化的PM模型可以节省大量成本。要实现有效的预防性公路养护，就要为特定的路面及时部署适当的施工工艺和养护技术解决方案，因此，PM主要依赖于智能测试、检测方法和科学的决策过程^[5]。王丽君利用重构数据包络分析（DEA）方法开发了PM时机与对策的集成优化模型，该模型利用不同时机和对策组合了多个PM方案^[6]。李猛等针对三种类型的道路沥青，研究了使用功能性预养护材料提高沥青路面有效性的最佳时机^[7]。高旭基于建筑信息管理（BIM）技术开发了沥青路面的PM模型，并使用分层分析来确定

最有效的PM措施^[8]。各种方法都有其特点和局限性，其有效性受到路面、交通状况、自然气候等因素影响。因此，PM措施应根据具体情况综合考虑。苗英豪等应用分析网络过程建立分析矩阵，根据路面寿命、路面条件、环境变化和成本等因素比较不同的养护方法，以确定最佳的养护解决方案^[9]。李红梅提出一种选择路面养护措施的优化模型，利用平均成本法和成对线性规划法求解最优养护策略^[10]。这些方法可以帮助交通运输部门根据路面条件、外部环境和成本考虑，为沥青路面运维管养制定科学的决策。

本文旨在研究四种养护方法对预防性养护沥青路面抗滑性能的效果，分析了沥青路面摩擦系数BPN和路面纹理剖面平均深度MPD的衰减曲线，建立了沥青路面抗滑性能劣化模型，将现有的沥青路面抗滑劣化模型与时间/路况法相结合，确定最佳养护时机，并对不同的养护方法进行了评估和比较。

1 试验测试

1.1 试验设备及试件制作

本研究采用多功能路面磨耗试验机对高速公路SMA-13面层路面结构进行沥青路面磨耗试验。采用室内轮式铣刨技术制作了尺寸为300 mm×300 mm×50 mm的车辙板试件，所用的骨料为玄武岩，具体级配见表1。试验沥青采用SBS改性沥青，其油石比为5.84%。矿物填料采用石灰石，添加0.3%木质素纤维作为纤维组分。

表1 混合料级配

混合料类型	不同筛孔通过率/%									
	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
SMA-13	100	96	63.5	28	21.5	19	16.5	13	12	10

1.2 试验数据采集

采用环形加速加载磨耗试验设备进行磨耗试验（见图1、图2）。将36个SMA-13标准车辙板试件（300 mm×300 mm×50 mm）分为3组，每组测量16个点，其中每块车辙板转角1个点，直线边缘2个点，垂直总压力为4.5 kN，转速为60 r/min。在磨耗过程中，为了保持试件的湿润，需不断加水，每一阶段磨耗2万次，共磨耗20万次（包括初始无磨耗阶段）。垂直压力根据标准轴载进行换算。每个磨耗阶段完成后，采用摆锤试验机（BPT）测试路面的摩擦系数，并采用LS-40型高精度三维激光扫描仪采集路面纹理数

据。从图2可以看出，测量过程中准确地标记了测量区域，表明每次测试采集的数据都是准确的。由于在磨耗过程中不断加水，在每个磨耗阶



图1 室内磨耗试验 图2 试件测试区域范围

段结束后应将车辙板试件移开,进行自然干燥。

2 沥青路面抗滑性能劣化研究

2.1 沥青路面抗滑性能劣化趋势分析

本研究共采集了 528 组摩擦系数并进行统计,如图 3 所示。初摆摩擦系数 BPN 的均值和中值均超过 70,大部分数值分布在 68~75 之间,表明试件在磨耗前的初始抗滑性能良好。经过第一阶段的磨耗(2 万次磨耗循环)后,试件表面抗滑性能的衰减率增加,平均值和中值约下降了 15,这主要是轮胎碾压引起集料表面沥青膜脱落所致。在磨耗后期,摩擦系数下降的速度变慢,主要是由于沥青膜从粗集料表面脱落后,轮胎开始摩擦粗集料表面,骨料表面结构的磨耗时间相对更久,因此摩擦系数下降趋于稳定。

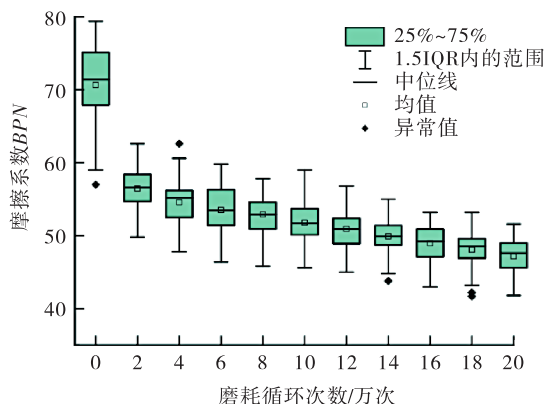


图3 摩擦系数 BPN 变化图

在路面纹理分析中,利用小波变换对路面表面的宏观纹理和微观纹理成分进行分离,宏观纹理是指波长大于等于 0.5 mm 的路面表面的大尺寸粗糙度,微观纹理是指波长小于 0.5 mm 的小尺寸粗糙度^[11]。采用 LS-40 扫描仪采集的路面高精度三维纹理数据,宏观和微观纹理波形叠加后与原始纹理波形近似,路面宏观和微观纹理波形的总体趋势与原始纹理波形一致。此外,由于微观纹理的存在,宏观纹理波形比原始纹理波形更平滑,这会导致出现较小范围的振荡,说明宏观纹理比原始纹理更平滑。

宏观和微观尺度采用剖面平均深度 MPD 作为路面纹理的评价指标。如图 4 所示,在前 2 万次磨耗循环中,宏观 MPD 逐渐减小,并在磨耗过程结束时逐渐增大,在 10 万次磨耗循环后保持相对稳定,在 16 万次磨蚀循环后略有增加。微观 MPD 在磨耗开始后下降趋势更明显,在 10 万次磨耗循环后相对稳定,在 16 万次磨耗循环

后略有增加,这与宏观 MPD 的变化趋势相似。可以预测,在初始磨耗循环过程中,骨料表面的沥青膜和部分微观结构具有较高的磨耗速率。沥青膜脱落后,轮胎与骨料棱角相互作用,导致两种纹理类型下降。然而,随着磨耗次数的增加,路面表面逐渐变得光滑,宏观及微观结构基本保持不变,在水、温度、荷载的共同作用下,路面面层骨料发生位移,碾压深度增加。

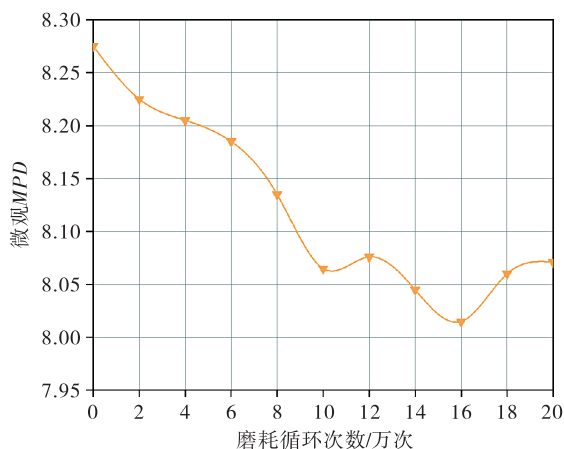


图4 MPD 变化趋势

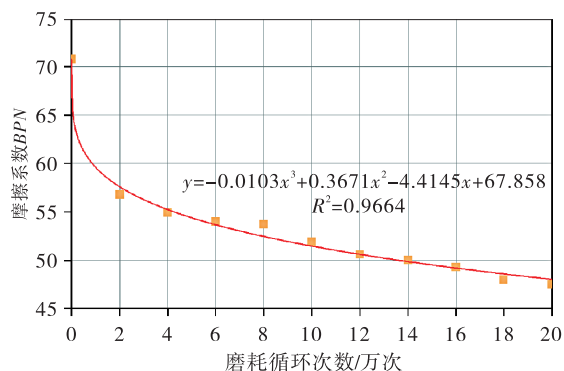


图5 沥青路面抗滑性能劣化相关性拟合曲线

2.2 沥青路面抗滑性能劣化相关性分析

沥青路面抗滑性能劣化相关性拟合公式包括

渐近拟合、宾州拟合、对数拟合、指数拟合和多项式拟合^[12]。通过对线性、指数、对数和多项式拟合公式进行比较分析，建立了基于三次多项式的沥青路面抗滑性能劣化相关性拟合公式，将摩擦系数值 y 与磨耗循环次数 x (万次) 相互关联。如图5所示，拟合公式的 R^2 值为 0.9664，拟合曲线与沥青路面抗滑性能劣化规律一致。

3 基于沥青路面抗滑性能的养护决策

3.1 沥青路面抗滑性能养护处理

沥青路面抗滑性能的常用养护技术有封层、加铺及再生。封层包括雾封、砾石封、稀浆封和微表处^[13]。铺装层可根据铺装厚度的不同分为薄层和超薄层；再生可分为原地/工厂热再生和原地/工厂冷再生。不同养护方法对沥青路面功能修复的适用性不同，除雾封层养护技术外，其他养护措施均可提高沥青路面的抗滑性能。本文研究了同步砾石封层、微表处、薄层罩面和热再生养护技术对沥青路面抗滑性能的影响。

3.2 沥青路面初养护效果的抗滑性能评价

从1.2节完成磨耗试验后的试件中选取部分进行养护，每3个磨耗试件选取1个进行养护，共选取12个车辙板试件，不同养护技术分别对应3个试件，抗滑性能指标取平均值进行分析，仅从4个角的板中采集单个区域的数据，但由于磨耗面积较大，在中间试件中采集了两个区域的数据。因此，对于每种养护技术，分别收集了养护前和养护后的4组数据，取各组数值的平均值，比较初期养护对抗滑性能的影响，评估结果如图6所示。从图中可以看出，养护前各试件组的平均摩擦系数约为45。养护后的平均摩擦系数超过65，抗滑性能明显提高，SMA-5薄层罩面养护后路面的摩擦系数超过了80，MS-3微表处在养护后的平均摩擦系数约为75。

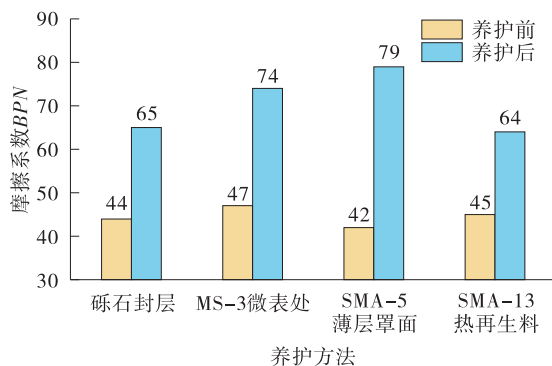


图6 不同养护方法的初期养护效果

3.3 不同养护方法对沥青路面抗滑性能的影响

本研究中，对试件进行养护后每组试件进行了10个阶段的磨耗试验，相当于20万次磨耗。在第6阶段，即12万次磨耗时，同步砾石封层和MS-3微表处养护试件出现了严重的骨料剥离，相比之下，SMA-5薄层罩面和SMA-13热再生养护试件则路面性能保持良好。由于前两种养护方法在12万次磨耗后，沥青路面路用功能完全丧失，因此只对每组养护方法前10万次磨耗（每个阶段磨耗2万次）的数据进行分析，计算了每种养护方法在6个阶段（包括初始无磨阶段）中每一阶段所测四组摩擦系数的平均值，图7为不同养护技术下路面磨耗衰减曲线。

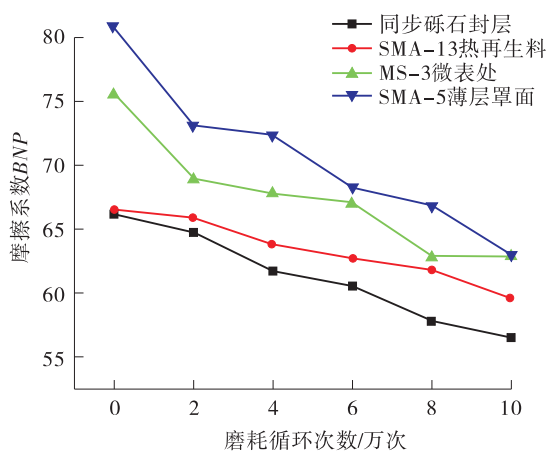


图7 不同养护方式下试件抗滑性能的变化趋势

结果表明，在试验条件下，4种养护方法在10万次磨耗循环后均出现了一定程度的抗滑性能衰减，整体抗滑性能由高到低的排序为：SMA-5薄层罩面、MS-3微表处、SMA-13热再生料、同步砾石封层。前两种养护方法使用了相对更细的骨料和丰富的表面结构，与轮胎的接触面积更大，因此，摩擦系数更高。

为了进一步分析不同养护方法的抗滑性能衰减情况，采用提出的抗滑性能衰减率对其进行量化。根据式(1)计算其抗滑衰减率。

$$k = \frac{f_0 - f_z}{f_0} \quad (1)$$

式中 f_0 、 f_z 分别表示初始抗滑能力和最终抗滑能力。同步砾石封层、MS-3微表处、SMA-5薄层罩面和SMA-13热再生料的最终计算值分别为0.156、0.187、0.233和0.131。MS-3微表处和SMA-5薄层罩面的抗滑衰减率较高，原因是其细集料含量更高，细集料在载荷下更容易发生压实变形，因此具有抗滑衰减率更高；SMA-13

热再生料中粗细集料结合形成了致密的骨架结构,导致抗滑性能衰减较为稳定;同步砾石封层采用同粒径的优质玄武岩,耐磨耗且不易压密,抗滑衰减率较低。

3.4 基于时间/路况方法的最佳养护时机确定

沥青路面抗滑养护的效果和成本效益主要取决于养护时机,如果现有路面性能没有得到充分利用,过早进行养护会造成资源浪费;相反,若路面性能显著下降,养护效果较差,需要进行大修或中修。目前常用的判定沥青路面抗滑养护最佳时机的方法包括时间/路况分析、全生命周期效益评估、成本-效益法,以及应用机器学习时间序列模型^[14]。本研究采用时间/路况分析来确定沥青路面抗滑养护的最佳时机,其主要目标是使路面保持良好的抗滑性能。因此,在确定最佳养护时机之前,了解路面的抗滑性衰减情况至关重要。根据前期研究,对于抗滑能力不足〔侧力系数(SFC) < 40〕的路段和主干道,或抗滑能力较差(SFC < 30)的次干道及以下路段,应采取抗滑养护措施。 SFC 可以换算为 BPN ,反之亦然,如式(2)所示。

$$SFC = 1.98BPN - 34 \quad (2)$$

由式(2)可知,当 SFC 为40时, BPN 约为37,路面抗滑性评价标准具体对应关系如表2所示。 SFC 为40、 BPN 约为37时,路面的抗滑性处于良好和中等之间的阈值。因此,在沥青路面的抗滑性达到中等状态之前,应采取养护措施。在本研究中,最佳的抗滑养护时机为 BPN 略小于37时,根据既往研究中沥青路面抗滑性能的最佳劣化模型,可以得到相应的沥青路面磨耗次数,模型如式(3)所示。

$$y = -0.0103x^3 + 0.3671x^2 - 4.415x + 67.858 \quad (3)$$

表2 路面抗滑性能评价标准

评价指标	优秀	良好	中等	较差	很差
SRI (路面抗滑性能指数)	≥ 90	[80, 90)	[70, 80)	[60, 70)	< 60
SFC	≥ 50	[40, 50)	[30, 40)	[20, 30)	< 20
BPN	≥ 42	[37, 42)	[32, 37)	[27, 32)	< 27

将摩擦系数37 ($y = 37$)代入式(4),对应的磨耗次数为232 153 000次,因此,基于本研究试验条件,最佳养护时机为23万次路面磨耗。根据试验验证,当超过20万次循环时,只要路面没有完全损坏,保持相同的荷载系数,该模型

仍然适用。本研究确定的最佳养护时间是特定于独特的测试条件,为了将研究成果应用于实际工程,应扩展数据集,调整相应的磨耗时间,以反映实际的沥青路面状况。

4 结语

本文提出了一种利用独立的路面加速磨耗系统来评估沥青路面抗滑性能的方法,分析了沥青路面摩擦系数 BPN 和路面纹理 MPD 的衰减曲线,并在此基础上建立了衰减预测模型,得到的 R^2 值为0.9664。该模型可与时间/道路状况分析方法相结合,用于确定路面抗滑性能不再满足使用要求时的磨耗次数,为道路养护科学决策的制定及提高养护决策的智能化提供有力的数据支持。

参考文献:

- [1]《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术研究综述. 2020[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 1-66.
- [2]吴寅文. 沥青路面抗滑性能影响因素及优化方法研究[J]. 交通世界, 2023(15): 93-95.
- [3]王勋,梁勇,陈搏,等. 骨架约束作用对沥青磨耗层抗滑性能影响研究[J]. 路基工程, 2022(02): 56-62.
- [4]曹一翔,孙杨勇. 基于轮胎与路面接触压力特性的路面抗滑性能评价方法[J]. 智能城市, 2021, 7(13): 9-12.
- [5]李志强. 沥青路面抗滑性不同评价指标及测试方法比较[J]. 筑路机械与施工机械化, 2018, 35(1): 111-115.
- [6]王丽君. 沥青路面预防性养护时机与对策一体优化研究[D]. 西安:长安大学, 2012.
- [7]李猛,袁青泉,冯雯雯,等. 基于路面整体结构长期性能保持的预防性养护策略研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(01): 10-12.
- [8]高旭. 基于BIM技术的路面预防性养护决策方法研究[D]. 西安:长安大学, 2020.
- [9]苗英豪,陈广辉,王文涛,等. 路面宏观纹理灰度差异矩阵特征在抗滑评价中的应用(英文)[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2015, 31(03): 389-395.
- [10]李红梅. 基于物元模型的网级高速公路沥青路面养护决策研究[D]. 南京:东南大学, 2017.
- [11]彭毅,李强,战友,等. 基于区域三维纹理特征的路面抗滑性能评估[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(04): 667-676.
- [12]刘成. 沥青路面抗滑性能非接触式评价与衰变预测集成学习模型研究[D]. 成都:西南交通大学, 2022.
- [13]侯梦阳. 高速公路沥青路面预防性养护[J]. 交通世界, 2021(36): 84-85.
- [14]蒙世杰. 基于沥青路面性能衰变特征的养护技术研究[J]. 西部交通科技, 2022(12): 61-63.