

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202311252024101979

文章编号:1674-599X(2024)06-0034-08

引用格式:王民,王明明,王滔,等.钢桥面沥青铺装磨耗层抗滑及耐磨耗性能分析[J].交通科学与工程,2024,40(6):34-41.

Citation: WANG Min, WANG Mingming, WANG Tao, et al. Analysis of skid resistance and wear resistance performance of asphalt pavement wearlayer on steel bridge deck[J].Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40(6): 34-41.

钢桥面沥青铺装磨耗层抗滑及耐磨耗性能分析

王民^{1,2},王明明³,王滔²,韦宏年⁴,李开一⁴

(1.招商局重庆交通科研设计院有限公司,重庆 400067;2.招商智翔道路科技(重庆)有限公司,重庆 401336;
3.重庆市建维工程检测有限公司,重庆 400020;4.重庆交通大学 土木工程学院,重庆 400074)

摘要:针对钢桥面铺装的厚度限制及密水性的要求,采用沥青混合料摩擦特性测试仪、激光扫描仪等设备对四种常用于钢桥面磨耗层的混合料进行了加速加载磨耗试验,并采用 Asymptotic 模型对数据进行拟合分析,从而确定了沥青混合料抗滑性能参数与磨耗次数之间的相关性。结果表明:随着磨耗次数的增加,沥青混合料的动态摩擦系数、摆值(BPN)、构造深度(MTD)及断面平均构造深度(MPD)均呈现出初期快速下降,后期逐渐减缓的趋势;Asymptotic 模型可对四种混合料抗滑性能与磨耗次数之间的关系进行准确表征,相关性系数达到0.95以上;从抗滑性能来看,改性沥青 SMA13 与 EA10 表现出了明显优势,特别是 EA10 的动态摩擦系数及摆值(BPN)两个指标均比其他三种混合料的高。然而,EA10 的构造深度(MTD)通常难以达到0.8的标准。结合工程实践经验,建议在磨耗层性能满足要求且其厚度允许的前提下,优先考虑采用改性沥青 SMA13。同时,由于现行规范要求的抗滑性能检测方法之间存在一定的差异,宜扩大样本来源,以更全面地阐明这些方法与路面抗滑性能之间的相关性。

关键词:钢桥面铺装;沥青磨耗层;加速加载磨耗试验;摩擦系数;构造深度

中图分类号:U414

文献标志码:A

Analysis of skid resistance and wear resistance performance of asphalt pavement wearlayer on steel bridge deck

WANG Min^{1,2}, WANG Mingming³, WANG Tao², WEI Hongnian⁴, LI Kaiyi⁴

(1. China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, China; 2. China Merchants Zhixiang Road Technology (Chongqing) Co., Ltd., Chongqing 401336, China; 3. Chongqing Jianwei Engineering Testing Co., Ltd., Chongqing 400020, China; 4. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In response to the requirements of thickness limitation and water tightness of steel bridge deck pavement, the accelerated loading wear test of four common mixtures for the wear layer of steel bridge decks was carried out with an asphalt mixture friction characteristic tester, a laser scanner, and other instruments. The Asymptotic model was used to fit and analyze the data, and the correlation between the parameters of skid resistance performance and wear times of the asphalt mixtures was determined. The results show that with the increase of wear times, the dynamic friction coefficient, British pendulum number (BPN), texture depth (MTD), and mean profile depth (MPD) of the asphalt mixtures all show a downward trend, with the decay rate being high first and then becoming low. The Asymptotic model can accurately characterize the relationship between skid resistance and wear times of the four mixtures, and the correlation coefficient is higher than 0.95. From the perspective of skid

收稿日期:2023-11-25

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2601202)

通信作者:王明明(1997—),女,助理工程师,主要从事道路工程检测及管理方面的研究工作。E-mail:1964641066@qq.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

resistance, modified asphalt SMA13 and EA10 have certain advantages. Especially, the dynamic friction coefficient and BPN of EA10 are higher than those of the other three mixtures. However, its MTD is usually difficult to reach 0.8. Combined with engineering practice experience, a suggestion is provided that priority should be given to SMA13 under the premise that the wear layer performance meets the requirements and the thickness is allowed. At the same time, there are some differences between the skid resistance performance detection methods in the current specifications. Thus, it is advisable to expand the sample source to clarify the correlation of these methods with skid resistance performance of pavement more comprehensively.

Key words: steel bridge deck pavement; asphalt wear layer; accelerated loading wear test; friction coefficient; texture depth

钢桥面铺装通常采用双层结构,厚度为6~8 cm。为了满足密水性、耐久性、协同变形性能等要求,国内普遍采用细粒式混合料作为铺装材料^[1-2]。然而,细粒式混合料磨耗层在初始阶段的抗滑性能有限,且在特殊应用场景下,其抗滑性能衰减较快。因此,钢桥面沥青磨耗层的抗滑耐久性能已得到了行业的普遍关注^[3-4]。钢桥面铺装的特殊使用环境和材料特性使其对抗滑性能有着更高的要求。针对使用过程中钢桥面铺装环氧沥青混凝土出现的问题,张肖宁等^[5]采用了改进后的密断级配主骨料空隙填充(CAVF)法来提升环氧沥青混合料的抗滑性能。程蓝星^[6]监测了国内某钢桥环氧沥青混凝土铺装结构的摩擦系数的变化情况,并利用非线性自回归神经网络模型对钢桥面的抗滑性能进行了预测分析。随着交通工程技术的不断进步,分形理论、有限元数值模拟、表面纹理分析等先进技术已逐步被运用于抗滑性能衰减规律的研究中。杨荣尚等^[7]通过分析车辆行驶过程中轮胎与路面的相互作用,提出了沥青混合料的衰减非线性模型。曹志飞^[8]揭示了级配对路面抗滑性能衰减的重要影响,并通过灰色关联法确定了关键级配,为路面材料的设计和优化提供了重要参考。王元元^[9]通过光度立体技术提取了路表纹理信息,分析了表面粗糙特性与路面抗滑性能之间的关系,并建立了基于表

面粗糙特性的抗滑性能评价体系。陈先华等^[10]结合室内加速磨光试验结果,确定了影响沥青混合料抗滑性能及其下降速率的关键材料因素,为材料的选择提供了科学依据。KOKKALIS等^[11]通过分形维数对不同微观及宏观构造的沥青路面抗滑性能进行了评价,证明了分形理论在路面抗滑性能评价中的有效性。

普通沥青路面抗滑性能的研究已经相对完善,但对于不同类型钢桥面铺装磨耗层抗滑性、耐久性的系统研究仍较少。目前,钢桥面磨耗层应用最多的材料为SMA10,其次为EA10,近年来部分工程也采用了SMA13、AC13材料^[12-13]。基于此,本文采用上述四种混合料开展加速加载磨耗及抗滑指标衰减规律的研究。

1 原材料及混合料

1) 原材料。

沥青胶结料采用钢桥面铺装常用的高弹改性沥青,其性能指标见表1。环氧沥青胶结料采用热拌型材料,其性能指标见表2。粗、细集料选取峨眉玄武岩碎石,矿粉采用石灰岩矿粉,性能均满足《公路钢桥面铺装设计与施工技术规范》(JTG/T3364-02—2019)的规定。

表1 高弹改性沥青基本性能指标

Table 1 Basic performance indicators of high-elastic modified asphalt

项目	25 °C针入度/0.1 mm	软化点/°C	5 °C延度/cm	135 °C黏度/(Pa·s)	25 °C弹性恢复率/%	旋转薄膜烘箱试验(163 °C)			
						质量变化/%	25 °C针入度比/%	25 °C弹性恢复率/%	5 °C延度/cm
检测结果	69	90	58	2.6	93	-0.4	76	79	36
技术要求	60~80	≥85	≥40	≤3.0	≥90	-1.0~+1.0	≥65	≥70	≥25
试验方法	T0604	T0606	T0605	T0621	T0662	T0610			

注:试验方法具体步骤参见《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)。

表2 环氧沥青胶结料基本性能指标

Table 2 Basic performance indicators of epoxy asphalt as cementing material

项目	23 °C拉伸强度/MPa	23 °C断裂伸长率/%
检测结果	2.7	270
技术要求	≥2.0	≥100

2) 沥青混合料。

采用马歇尔体积设计法,进行SMA10、SMA13、AC13及EA10的配合比设计,矿料级配设计曲线见图1,SMA的纤维质量分数均为0.3%,混合料基本性能指标见表3。

能指标见表3。

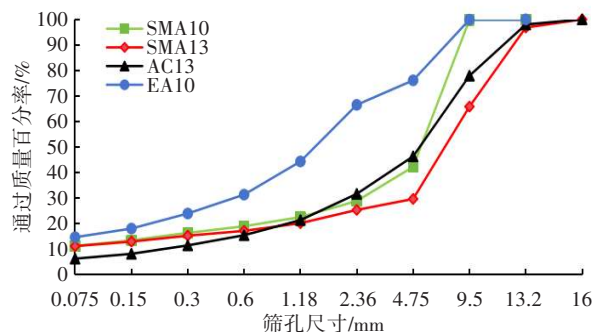


图1 矿料级配设计曲线

Fig. 1 Design range of ore grading

表3 混合料基本性能指标

Table 3 Basic performance indicators of asphalt mixtures

项目	最佳油石比/%	空隙率/%	矿料间隙率/%	粗集料骨架间隙率/%	沥青饱和度/%	马歇尔稳定度/kN	马歇尔流值/mm	谢伦堡析漏损失/%	肯塔堡飞散损失/%	冻融劈裂强度比/%	70 °C动稳定度/(次·mm ⁻¹)	-10 °C极限弯拉应变/10 ⁻⁶
SMA10	6.3	3.8	16.8	39.1	77.1	10.50		0.04	7.2	97.9	3 257	3 675
SMA13	6.1	3.7	17.0	39.3	78.4	9.80		0.05	7.4	95.6	3 786	3 597
AC13	5.0	3.4			69.9	9.20	2.70			90.1	3 725	3 654
EA10	6.7	1.8				79.90	3.11			92.7	90 046	4 864
试验方法	T0705					T0709		T0732	T0733	T0729	T0719	T0715

2 试验方案

1) 试件制备:将在实验室成型的SMA10、SMA13、AC13、EA10标准车辙试件切割成300 mm×150 mm×50 mm的长方体试件。

2) 加速磨耗仪器:采用招商局重庆交通科研设计院有限公司研发的集料/沥青混合料摩擦特性测试仪对四种混合料进行加速加载磨耗试验^[14],模拟汽

车轮胎对公路沥青路面的作用,实时记录加速磨光过程中试件板表面的抗滑摩擦力。设备参数见表4。该仪器采用一个小型直道作业系统,沥青混合料试件板被固定于仪器试件槽中,采用橡胶磨具在试件板表面进行往复磨光磨耗运动。最后根据匀速运动阶段的正压力与摩擦力,计算出动态摩擦系数。

加速加载磨耗前后试件的表观状态如图2所示,试验温度为25 °C,荷载水平为980 N,加载频率为30次/min。

表4 集料/沥青混合料摩擦特性测试仪设备参数

Table 4 Parameters of aggregate/asphalt mixture friction characteristic tester

行走速度/(次·mm ⁻¹)	加载荷载/N	试件尺寸/mm	橡胶块硬度(邵氏A)/度	滑溜率/%	接触面积/mm ²	单向单次距离/mm	温度/°C
0~30	0~2 942	300×150×50	65~75	100	12 000	130~160	30~60 (或室温)

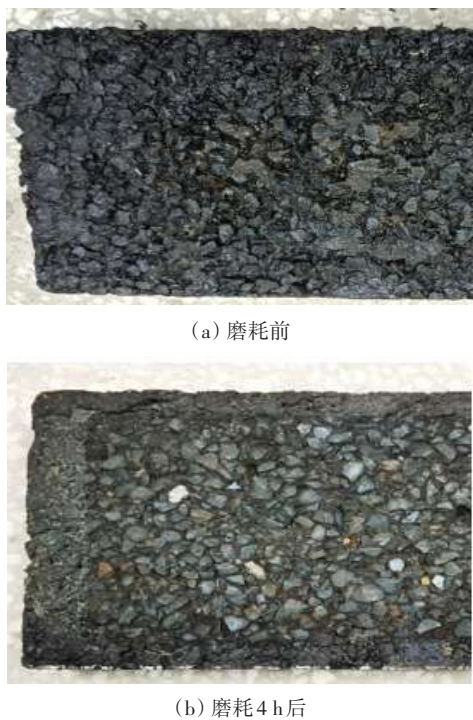


图2 加速加载磨耗前后试件表现状态

Fig. 2 Apparent state of specimens before and after accelerated loading wear

3) 数据采集:加速加载磨耗前后及过程中均需采集摩擦系数及表面纹理构造参数^[15],抗滑性能指标采集方法见表5,采集频率为1次/h。

表5 抗滑性能指标采集方法

Table 5 Test methods for skid resistance performance indexes

项目	评价指标	测试方法/设备
摩擦系数	动态摩擦系数	摩擦特性测试仪
	摆值(BPN)	摆式摩擦仪
表观纹理特征	构造深度(MTD)	铺砂法
	断面平均构造深度(MPD)	激光扫描仪

3 基本模型及数据处理方法

3.1 基本模型

目前,抗滑性能模型主要分为经验统计模型、力学模型、机器学习预估模型三大类。其中,经验统计模型包括传统经验模型(Penn State抗滑模型、PIARC模型)、基于纹理特征参数统计模型等;力学模型包括有限元模拟方法、力学解析法等;机器学习预估模型包括基于图像数据的路面状态机器学习识别方法、路面抗滑性能预估的机器学习方法等。

通过分析常用模型的优缺点,本文选取经验统计模型中的Asymptotic模型对钢桥面沥青磨耗层抗滑性能的衰减规律进行拟合分析。其公式为:

$$Y = Ae^{Bx} + C \quad (1)$$

式中:Y为抗滑性能指标;x为磨耗次数;A为衰减幅度;B为衰减速率;C为衰减终值。其中,当x=0时,Y=A+C为路面的抗滑性能初值;当x→∞时,Y=C即为路面的抗滑性能终值。

在该模型中,定义抗滑性能的初值为钢桥面沥青磨耗层刚完成铺筑时路面所展现的抗滑性能数值,对于室内试验而言,则是指试件板制备完毕后测得的抗滑性能值。终值是指磨耗层历经车辆荷载的长期反复作用,其抗滑性能指标达到稳定状态时的数值,具体而言,是在经过4h的加速加载磨耗测试后,试件表面所保持的抗滑性能水平。衰减速率用于评估磨耗层在使用过程中抗滑性能下降的速度,而衰减幅度则是通过计算初值与终值之间抗滑性能的差值,并将该差值与初值相比较,以此来量化抗滑性能降低的程度。

3.2 数据处理方法

1) 数据归一化处理方法。

受拌和成型等因素的影响,SMA10初始表面抗滑性能指标往往存在一定差异。为了消除数据样本取值及量纲不同所带来的影响,并更直观地展现样本抗滑性能的衰减规律,须对测试结果进行处理,将所有数据统一到相同的基准值下进行比较分析。

结合数据特征并对比三种常用方法(最小-最大归一化、零-均值归一化及最大值归一化)后,本文选用最大值归一化方法进行数据处理。这种方法通过将各组数据中的每个值除以该组数据的最大值,从而将数据调整成统一格式。具体来说,就是将组内的最大值设定为1,而其他所有值都将小于1。这一转换过程可以通过式(2)所描述的函数来实现:

$$X^* = \frac{X}{X_{\max}} \quad (2)$$

式中:X*为归一化后的表征值;X为原始数据;X_{max}为数据最大值。

2) 衰减速率计算方法。

以SMA10为例,在试验荷载为980N、温度为25℃的条件下,得到了加速加载磨耗试验的动态摩擦系数-磨耗次数变化曲线,如图3所示。为准确确定两阶段衰减曲线的转折点,对曲线方程进行求导。并在作用次数范围内,以导数值的极大值、极小值点绘制切线,两条切线的交点N*可作为衰减速率的拐点,它标志着路面抗滑性能从快速衰减阶段(第一阶段)过渡到稳定衰减阶段(第二阶段)。

在确定衰减速率的拐点 N^* 之后,以每 100 次磨损为间隔,计算并绘制了各点的衰减速率图。为了合理地选取可表征两阶段衰减速率的代表值,在第一阶段,本文计算了从磨损开始到 $N^* \times 50\%$ 次这一区间内曲线斜率的平均值,以此作为该阶段的衰减速率代表值;在第二阶段,本文选取了从 $(7\ 200 - N^*) \times 50\%$ 次到 7 200 次这一区间的斜率平均值,以此作为该阶段的衰减速率代表值。

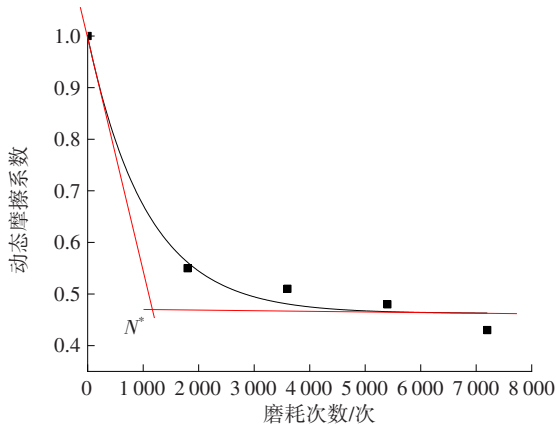
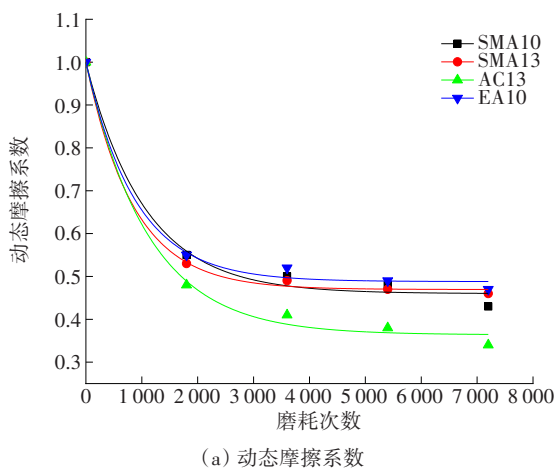


图3 沥青混合料动态摩擦系数随磨损次数的衰减曲线
Fig.3 Dynamic friction coefficient decay curve of asphalt mixture over wear times

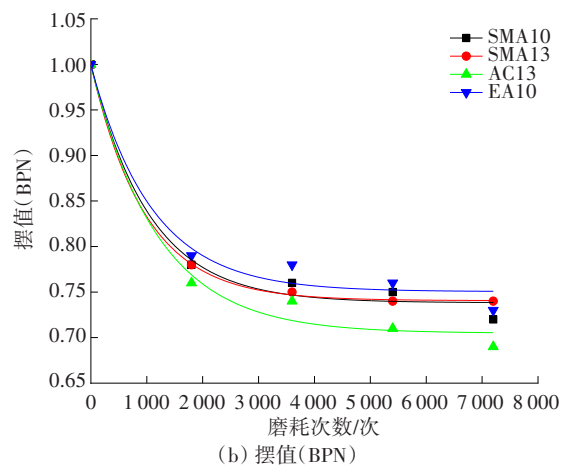
4 结果分析与讨论

4.1 衰减规律分析

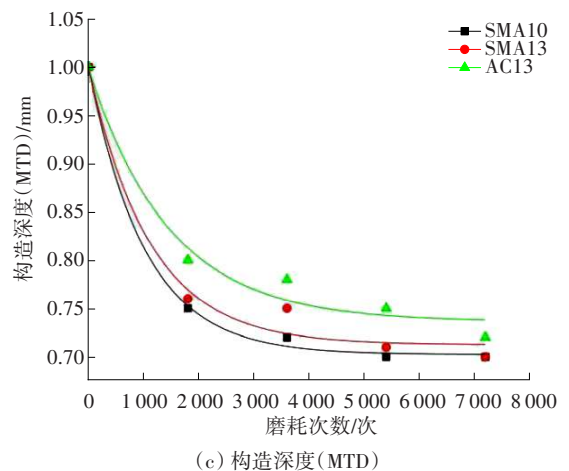
基于 Asymptotic 模型,利用 Origin 软件对 SMA10、SMA13、AC13、EA10 的不同抗滑性能-磨损次数进行了拟合,不同混合料抗滑性能-磨损次数拟合曲线如图 4 所示,其相关性系数均大于 0.95。由于 EA10 的构造深度(MTD)数值非常小,因此未采集其构造深度(MTD)。



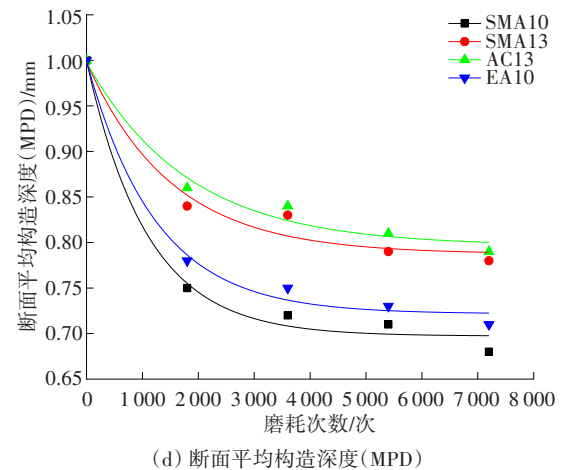
(a) 动态摩擦系数



(b) 摆值(BPN)



(c) 构造深度(MTD)



(d) 断面平均构造深度(MPD)

图4 不同混合料抗滑性能-磨损次数拟合曲线

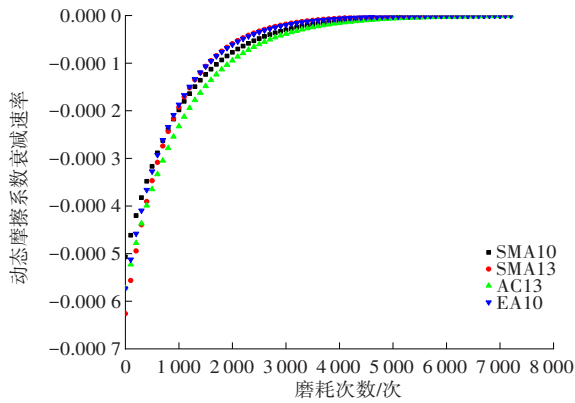
Fig.4 Fitting curves of skid resistance performance of different mixtures against wear times

从图4可知:

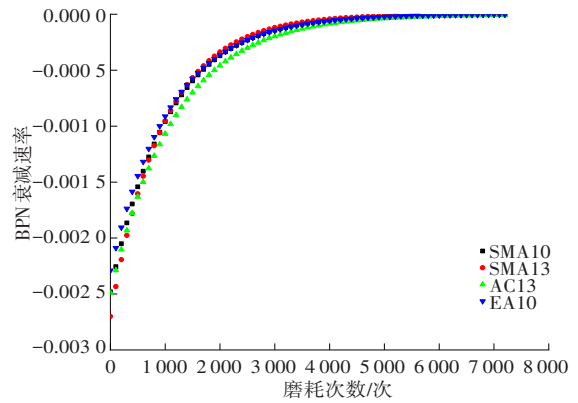
1) 以动态摩擦系数为例,随着磨损次数的增多,混合料动态摩擦系数呈现出先快后慢的下降趋势。在第一阶段,混合料动态摩擦系数快速下降;在第二阶段,混合料动态摩擦系数缓慢下降。其他抗滑指标也呈现出类似的变化规律。

2) 在磨耗过程中,EA10的动态摩擦系数最大,SMA13与SMA10的动态摩擦系数相差不大,SMA10粒径相对较小,衰减较快,磨耗过程中其拟合曲线与SMA13的存在交叉。而AC13的动态摩擦系数则明显比其他混合料的低,这一现象与沥青混合料的级配特征高度吻合。尽管EA10属于密级配类型,表面构造相对较小,但其可以通过高强度的环氧树脂胶结料提供持续、持久的抗滑性能,因而其动态摩擦系数最大。摆值(BPN)的测试原理与动态摩擦系数的测试原理是一致的,因此,不同类型混合料的BPN测试结果呈现出与动态摩擦系数相似的趋势。

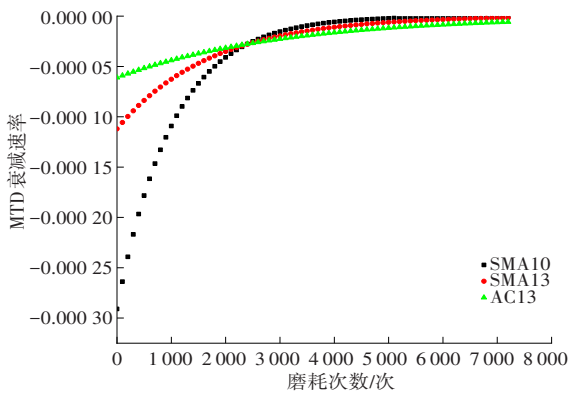
3) 构造深度(MTD)与断面平均构造深度(MPD)的变化趋势基本一致。由图4(c)可知,粗粒径13型混合料的构造深度均比10型混合料的大。然而,在对比AC13与SMA13、EA10与SMA10时,发现它们之间的差异与实际情况存在细微的不符。这种不一致主要归因于数值差异本身较小,以及室内成型加工等试验过程中可能引入的误差,这些因素共同导致了试件表面状态的轻微偏差。



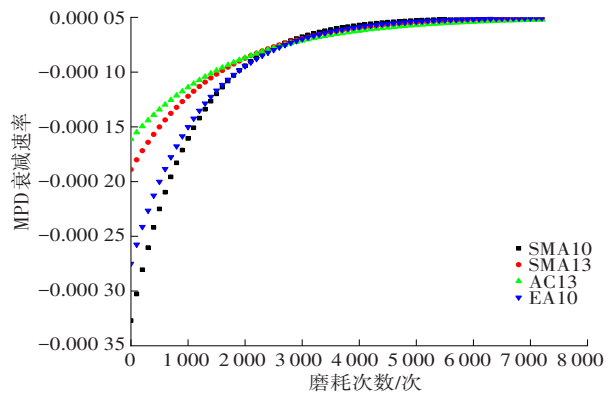
(a) 动态摩擦系数(Dμ)



(b) 摆值(BPN)



(c) 构造深度(MTD)



(d) 断面平均构造深度(MPD)

图5 不同混合料抗滑性能衰减速率-磨耗次数关系图

Fig. 5 The relationship between the decay rate of skid resistance performance and wear times for different mixtures

4.2 衰减速率分析

1) 确定两阶段拐点。

通过对拟合方程进行求导,本文确定了导数达到最小值和最大值时所对应的磨耗次数,并据此绘制了相应的切线,将其交点作为第一、二阶段衰减速率的拐点,计算得到各项指标的拐点 N^* ,结果见表7。

表7 混合料衰减速率拐点次数

Table 7 Number of inflection points of decay rates of skid resistance indexes for different mixtures 次

混合料	动态摩擦系数	BPN	MTD	MPD
SMA10	1 055	1 045	1 316	957
SMA13	1 032	1 213	1 612	1 453
AC13	1 099	846	2 289	1 678
EA10	1 043	1 076		1 200

2) 计算两阶段衰减速率。

以100次为间隔,计算SMA10、SMA13、AC13、EA10的衰减速率,其抗滑性能衰减速率-磨耗次数关系曲线如图5所示。在确定拐点 N^* 后,以拐点 N^* 为分界点,取 $0 \sim N^* \times 50\%$ 区间斜率平均值作为第一阶段的衰减速率,取 $(7\ 200 - N^*) \times 50\% \sim 7\ 200$ 区间斜率平均值为第二阶段的衰减速率,结果如图6所示。

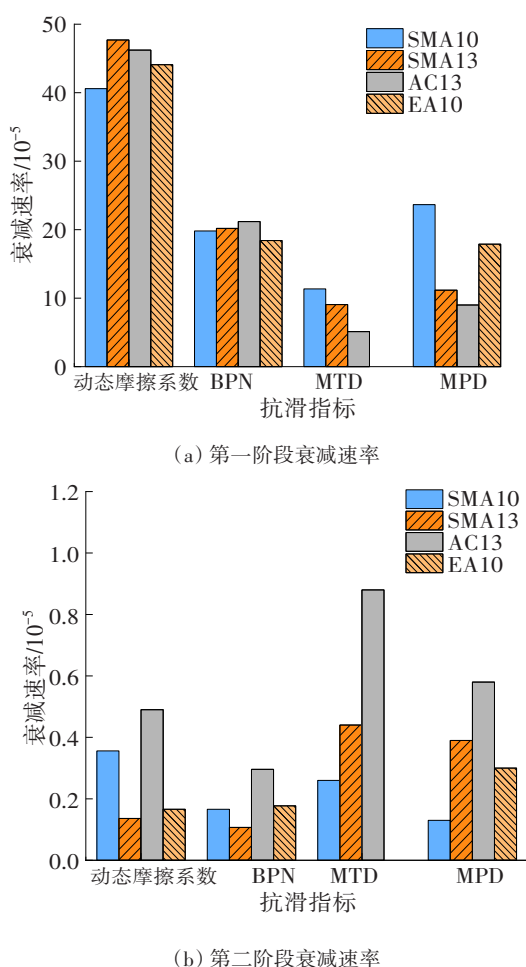


图6 不同混合料两阶段衰减速率

Fig. 6 Two-stage decay rate for different mixtures

由表7及图5、图6可知:①对于第一、第二阶段,动态摩擦系数与摆值(BPN)衰减速率的变化趋势基本一致,构造深度(MTD)与断面平均构造深度(MPD)衰减速率的变化趋势基本一致。这表明,基于相同原理所设计的评价方法及其所得出的结果是相互印证的。加速加载磨耗仪所施加的正压力较大,导致摩擦力相应增大,因而第一阶段动态摩擦系数的衰减速率较快。②四种类型混合料的动态摩擦系数与摆值(BPN)在第一阶段均较为接近,衰减速率较快。进入第二阶段后,各混合料的这两个指标间存在一定差异,且衰减速率均较第一阶段有明显下降,特别是EA10与SMA13表现得尤为明显,这与当前工程的实际使用情况是相吻合的。③对于同一类型混合料的构造深度(MTD)与断面平均构造深度(MPD),前后两阶段的衰减速率呈现出相反的趋势。如对两阶段的衰减速率进行绝对值求和,四种混合料基本处于同一水平,即在作用次数范围内,四种混合料的整体衰减速率基本一致;但对于长期抗滑性能而言,由于SMA10与

EA10粒径较小,在磨耗过程中,其表面构造变化较小,因此在第二阶段衰减速率较慢。综上分析,从试验结果来看,改性SMA13、SMA10与EA10在抗滑性能和长期抗滑性能方面表现较为优异。但在实际的钢桥面铺装结构设计过程中,还需综合考虑恒载(如厚度)及成本等因素。因此,目前钢桥面沥青磨耗层采用改性沥青SMA10的情况较为普遍。

5 主要结论及问题

1) 随着磨耗次数的增大,四项抗滑性能评价指标均呈现出先快后慢的衰减趋势,衰减规律具有一致性,符合沥青路面抗滑性能“先快后慢”的演变规律。选取Asymptotic模型可以对SMA四种混合料的抗滑性能-磨耗次数之间的关系进行准确表征,其相关系数均大于0.95。

2) 四种类型混合料的动态摩擦系数与摆值(BPN)在第一阶段较为接近,衰减速率较快。进入第二阶段后,各混合料的这两个指标间存在一定差异,且衰减速率均较第一阶段有明显下降。表征表观纹理特征的MTD与MPD呈现出一致的变化规律,其中粗粒径的13型混合料的构造深度均比10型混合料的高,说明粒径越大,混合料抗滑性能越好。其中改性沥青SMA10与SMA13都具有较优的抗滑性能。

3) EA10的表面纹理特征参数MTD、MPD与SMA10的接近,但其动态摩擦系数及BPN更佳,这两个指标均比其他三种混合料的高,主要得益于热固性胶结料的结构特性;改性沥青AC13的动态摩擦系数及BPN均最小,但表面构造仍比10型混合料的高。

4) 从抗滑性能指标来看,动态摩擦系数和BPN可较好地表征摩擦特征;从抗滑性能来看,SMA13与EA10具有一定的优势。

综合以上意见,考虑到抗滑性能,同时在磨耗层性能满足要求、厚度允许的前提下,优先考虑采用改性沥青SMA13。但受室内成型工艺等因素影响,试件表面表观特征与实体工程还存在一定差异,需要扩大样本来源,进行抗滑耐久性分析,这对指导钢桥面沥青铺装磨耗层设计及预防养护决策具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] 郝增恒,王民.大跨径钢桥面沥青混合料铺装技术[M].北京:人民交通出版社,2018.
HAO Zengheng, WANG Min. Asphalt mixture paving technology for long-span steel bridge deck[M]. Beijing:

- China Communications Press, 2018.
- [2] 谭忆秋,肖神清,熊学堂.路面抗滑性能检测与预估方法综述[J].交通运输工程学报,2021,21(4):32-47. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.04.002.
TAN Yiqiu, XIAO Shenqing, XIONG Xuetao. Review on detection and prediction methods for pavement skid resistance [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21 (4) : 32-47. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.04.002.
- [3] 刘阳.基于表面细观纹理的钢桥面沥青混凝土铺装抗滑机理研究[D].南京:东南大学,2019.
LIU Yang. Study on anti-sliding mechanism of asphalt concrete pavement on steel bridge deck based on surface meso-texture[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [4] 王民,王明明,王滔,等.重庆地区钢桥面浇注式沥青铺装体系使用状况调查分析[J].公路交通技术,2021,37(6):1-8. DOI: 10.13607/j.cnki.gljt.2021.06.001.
WANG Min, WANG Mingming, WANG Tao, et al. Analysis on behavior in service of gussasphalt of steel bridge deck in Chongqing area [J]. Technology of Highway and Transport, 2021, 37 (6) : 1-8. DOI: 10.13607/j.cnki.gljt.2021.06.001.
- [5] 张肖宁,张顺先,徐伟,等.基于使用性能的钢桥面铺装环氧沥青混凝土设计[J].华南理工大学学报(自然科学版),2012,40(7):1-7. DOI: 10.3969/j.issn.1000-565X.2012.07.001.
ZHANG Xiaoning, ZHANG Shunxian, XU Wei, et al. Application performance-based design of epoxy asphalt concrete applied to steel bridge deck pavement [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 40 (7) : 1-7. DOI: 10.3969/j.issn.1000-565X.2012.07.001.
- [6] 程蓝星.钢桥面环氧沥青铺装全寿命周期抗滑性能演化行为研究[D].南京:东南大学,2018.
CHENG Lanxing. Study on the evolution behavior of anti-sliding performance of epoxy asphalt pavement on steel bridge deck in the whole life cycle [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [7] 杨荣尚,张争奇,赵战利.沥青混合料加速加载试验机开发及抗滑衰减模型研究[J].中外公路,2007,27(5):206-209. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2579.2007.05.062.
YANG Rongshang, ZHANG Zhengqi, ZHAO Zhanli. Development of accelerated loading testing machine for asphalt mixtures and study of anti-slip attenuation model [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2007, 27 (5) : 206-209. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2579.2007.05.062.
- [8] 曹志飞.沥青与级配对超薄磨耗层路用性能及抗滑噪声特性影响[D].西安:长安大学,2020.
CAO Zhifei. Influence of road performance and anti-slip noise characteristics of asphalt and grade paired ultra-thin wear layer[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [9] 王元元.沥青路面抗滑特性与其表面粗糙特性之关系研究[D].南京:东南大学,2017.
WANG Yuanyuan. Study on the relationship between skid resistance characteristics of asphalt pavement and its surface roughness characteristics [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [10] 陈先华,陈胜霞,黄晓明,等.沥青路面的磨光研究:从宏观到微观尺度[J].中外公路,2013,33(2):45-50. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2013.02.013.
CHEN Xianhua, CHEN Shengxia, HUANG Xiaoming, et al. Abrasion study of asphalt pavement: from macroscopic to microscopic scale [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2013, 33(2): 45-50. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2013.02.013.
- [11] KOKKALIS A G, TSOHOS G H, PANAGOULI O K. Consideration of fractals potential in pavement skid resistance evaluation [J]. Journal of Transportation Engineering, 2002, 128(6): 591-595.
- [12] 徐鸥明,向顺琳,杨星皓,等.钢桥面铺装层材料应用与发展[J].公路,2022,67(9):44-50.
XU Ouming, XIANG Shunlin, YANG Xinghao, et al. Application and development of steel bridge deck pavement structure and materials [J]. Highway, 2022, 67 (9) : 44-50.
- [13] 孟凡超,金秀男,张革军.跨海桥梁超大规模钢桥面铺装关键技术研究[J].土木工程学报,2023,56(3):58-69. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.21111180.
MENG Fanchao, JIN Xiunan, ZHANG Gejun. Research on key technologies of very large-scale steel deck pavement for cross-sea bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56 (3) : 58-69. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.21111180.
- [14] 孔令云,尹果果,林雄伟,等.基于集料力学指标的沥青路面抗滑性能衰减模型[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2017,14(3):13-20. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2017.03.003.
KONG Lingyun, YIN Guoguo, LIN Xiongwei, et al. Anti-sliding performance attenuation model of asphalt pavement based on aggregate mechanical index [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2017, 14(3): 13-20. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2017.03.003.
- [15] 解晓光,刘东旭,陈贺.沥青混合料的长期抗滑性能评价指标[J].哈尔滨工业大学学报,2020,52(9):45-50. DOI: 10.11918/201904066.
XIE Xiaoguang, LIU Dongxu, CHEN He. Evaluation index of long-term skid resistance property of asphalt mixture [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(9): 45-50. DOI: 10.11918/201904066.

(责任编辑:薛仪)