

基于室内加速加载试验的沥青混合料抗滑性能优化研究

潘艳珠¹, 罗传熙^{2,3}, 李伟雄³, 王端宜²

(1. 广东交通职业技术学院, 广东 广州 510650; 2. 华南理工大学, 广东 广州 510641;

3. 广州肖宁道路工程技术研究事务所, 广东 广州 510640)

摘要: 鉴于路面抗滑的重要性, 以及沥青路面抗滑性能快速衰减带来的一系列问题, 本研究基于沥青路面抗滑性能的可设计性和国内外近年来在沥青路面抗滑设计方面的成果, 设计了三种级配类型 (粗、中和细) SMA 混合料, 探讨和验证在沥青混合料配合比设计阶段应用室内路表面功能驱动轮式加速加载系统评价和优化沥青混合料抗滑性能的可行性和效果, 以及室内外抗滑性能检测和评价的关联方法。加速加载试验结果显示, 沥青混合料的级配对长期抗滑性能影响显著; 在沥青混合料设计阶段应用加速加载试验优化沥青混合料设计可行且必要, 可以有效降低沥青路面全寿命周期养护成本。

关键词: 沥青路面; 抗滑性能; 沥青混合料; 加速加载试验; 优化设计

中图分类号: U414

文献标识码: A

Study on Optimization of Skid Resistance Performance of Asphalt Mixture Based on Indoor Accelerated Loading Test

PAN Yanzhu¹, LUO Chuanxi^{2,3}, LI Weixiong³, WANG Duanyi²

(1. Guangdong Communication Polytechnic, Guangzhou 510650, Guangdong, China;

2. South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong, China;

3. Guangzhou Xiaoning Road Engineering Technology Research Institute, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: Given the importance of pavement skid resistance and the series of problems caused by the rapid deterioration of skid resistance performance of asphalt pavements, this study is based on the designability of asphalt pavement skid resistance and domestic and international achievements in asphalt pavement skid resistance design in recent years. Three types of gradation (coarse, medium, and fine) of SMA mixtures were designed to explore and verify the feasibility and effectiveness of evaluating and optimizing the skid resistance performance of asphalt mixtures using an indoor road surface functional driving wheel-type accelerated loading system during the asphalt mixture mix design stage, as well as the correlation method for indoor and outdoor skid resistance performance testing and evaluation. Accelerated loading test results show that the gradation of asphalt mixtures has a significant impact on long-term skid resistance performance. Applying accelerated loading tests to optimize asphalt mixture design during the design stage is feasible and necessary, which can effectively reduce the life cycle maintenance cost of asphalt pavements.

Key words: asphalt pavement; skid resistance performance; asphalt mixture; accelerated loading test; optimization design

随着我国公路交通事业的快速发展, 特别是《交通强国建设纲要》的实施, 行车安全问题日

益受到重视。路面抗滑性能作为影响交通安全的关键因素, 直接关系到车辆的制动距离、操控稳

收稿日期: 2025-11-11

作者简介: 潘艳珠, 教授, 博士, 研究方向为路基路面工程

基金项目: 广东省自然科学基金面上项目 (编号: 2019A1515011965); 广东交通职业技术学院项目 (编号: GDCP-HX-2023-075)

定性和行车舒适性。有文献报道，约 70% 由路面条件导致的交通事故，与路面抗滑性能不足有关，且这类事故原本是可以避免的^[1]。大量高速公路沥青路面检测结果表明，抗滑性能不足经常是引发路面养护或预防性养护的主要原因。部分高速公路甚至通车 3 ~ 4 年就出现抗滑性能不足的问题，这将严重影响高速公路的服务质量和运营成本。然而，我国现行沥青路面施工技术规范对于沥青混合料设计没有提出抗滑性能指标、评价方法与验证要求，仅建议采用硬质耐磨的粗集料用作面层的沥青混合料及给出了磨光值（PSV）指标和要求^[2]。沥青混合料设计阶段缺少针对抗滑性能的设计、评价和验证体系，据推测这是高速公路项目沥青路面抗滑性能快速衰减、不同项目路面抗滑性能衰减速率存在差异的主要原因。

关于沥青混合料抗滑性能的室内评价试验的手段和方法，Karol Kowalski 等人研究开发了一种沥青混合料试件的室内加速磨光设备，并对 46 种不同 Superpave 混合料进行了抗滑性能和噪音水平测试^[3]。研究结果表明，软质集料的抗滑耐久性低于硬质集料；在软质粗集料中加入 20% 以上的高抗磨光集料（如钢渣和石英岩等），其抗滑性能会显著提升。同时研究发现，公称最大集料粒径（NMAS）较大的混合料的整体抗滑性能优于粒径较小的混合料；呈 S 形的粗型级配曲线和细度模数较高（ $FM \geq 4.6$ ）的混合料通常具有更丰富的宏观构造和更大的摩擦系数。这些成果和发现与道路行业对沥青路面抗滑性能的认识是一致的^[4-5]。同时也证明，沥青混合料的抗滑性能是可以优化的，可以通过有效的材料选择和构成设计来实现。雷超旭经考察后认为，现有的路面加速加载试验设备和室内圆盘式加速磨光设备均采用拖曳式加载轮的路面加载方式，无法模拟汽车驱动轮与路面表面的相互作用及对路面表面功能造成的磨光损伤，更无法建立与实际车轮荷载作用次数的一一对应关系。因此，其基于摩擦学原理，开发了“驱动轮式路表面功能加速加载试验系统”^[6]，并成功应用于沥青混合料抗滑性能评价和路面养护技术开发等领域^[7-8]。李彦标等人应用驱动轮式路表面功能加速加载试验系统和激光纹理仪快速采集试件表面微观和宏观构造，评价了粘层油同步和异步洒布的施工差异、混合料的级配类型以及沥青胶结料的品质差异对沥青路面超薄磨耗层脱皮和抗滑性能衰减速率的影响，为道路管理部门根据道路等级和交通量选择高性价比的超薄磨耗层类型提供了科学的依据

和技术支撑^[9-10]。徐驰针对湿热地区重载交通道路沥青路面抗滑性能的衰减机制与改善措施开展研究，采用摆式摩擦仪（BPT）和铺砂法测定室内加速加载试件的摆值 BPN 和构造深度 MTD 等及其变化规律；借助国际摩擦指数（IFI）建立室内外不同测试设备所得抗滑性能的对应关系，该方法匹配效果良好。该研究进一步通过现场道路验证了室内加载次数与现场行车荷载作用次数的关联规律，为采用室内加速加载试验评价、预测在役沥青路面抗滑性能提供了可靠依据^[11]。

本研究结合实际工程沥青混合料目标配合比设计，探讨了在沥青混合料设计阶段开展基于室内加速加载试验的沥青混合料抗滑性能评价与优化的可能性和可行性，构建了基于驱动轮式路表面功能加速加载试验系统和国际摩擦指数的室内外抗滑性能关联方法，解决了传统沥青混合料配比设计阶段因缺少路面抗滑性能评价和优化环节而产生的实际工程问题，满足了相关工程需求，以期提高沥青路面的抗滑性能和耐久性，降低路面全寿命周期的养护及运营成本。

1 试验设备与方法

1.1 驱动轮式路表面功能加速加载试验系统

本研究应用的路表面功能加速加载试验系统采用驱动轮加载方式，能够真实模拟汽车驱动轮与路面表面的相互作用及对路面表面功能造成的磨光等损伤行为。驱动轮式路表面功能加速加载试验系统的相关技术参数和检测内容如表 1 和图 1 所示。

表 1 驱动轮式路表面功能加速加载试验系统
相关技术参数和检测内容

模块	项目及参数内容	备注
技术 参数	驱动方式：摩擦力	—
	试件表面接触压力：0.7 ~ 0.8 MPa	真实货车轮胎压力
	试件表面作用荷载：2.5 kN	—
	试验环境温度：≤70℃（可以模拟降雨）	—
	模拟行车速度：5 ~ 40 km/h	—
检测 内容	批次试件数量：≤8	300 mm × 300 mm × 50 mm
	摩擦系数：BPN 或激光微观构造	
	构造深度：MTD 或激光宏观构造	
	重量损失： $\Delta m\% = 100 \times (m_0 - m_1) / m_0$	模拟脱粒或脱皮
	噪声：声压计（dB）	
	车辙深度：两路高精度激光巡检系统	



(a) 加速加载系统

(b) 弧形试模和试件

图1 驱动轮式加速加载系统

1.2 室内外路面抗滑性能关联方法

我国现行《公路技术状况评定标准》(JTG 5210—2018)采用路面抗滑性能指数(SRI)作为路面表面抗滑性能指标,其中的检测变量为路面横向力系数(SFC)。然而,室内试件的抗滑性能无法使用横向力系数检测设备检测,只能使用小型便携式检测设备,如摆式摩擦仪。在这样的背景下,建立室内外路面抗滑性能关联方法对实现沥青混合料设计阶段的抗滑性能优化显得尤为重要。

20世纪90年代初,国际道路协会(PIARC)为了解决世界各国道路或机场跑道表面抗滑性能检测设备和检测标准不一致的问题,组织开展了一项旨在比较和统一路面抗滑检测方法的试验项目(international experiment to compare and harmonize texture and skid resistance measurements),试验地点包括比利时、西班牙等国家。通过该试验项目,研究人员发现,在采用不同设备、不同测量速度及在不同测试条件下得到的抗滑性能结果差别很大。为使测量结果具有可比性,PIARC提出了国际摩擦指数(IFI)指标。美国材料与试验协会(ASTM)将该指标标准化,其最新标准版本为ASTM E1960—2023。

IFI的计算分为两个部分:滑动速度数(S_p)和摩擦系数(F_{60}),并表示为IFI(F_{60}, S_p)。基于摆式摩擦系数(BPN/100)和构造深度(MTD)计算滑动速度数和摩擦系数的公式如式(1)和式(2)所示:

$$S_p = a + b \times \text{MTD} \quad (1)$$

式中,MTD为路面表面平均构造深度,mm; a 和 b 为设备的标定参数。根据PIARC的标准,对于铺砂法测得的MTD,具体参数 $a = -11.6$, $b = 113.6$ 。

F_{60} 为标准速度(60 km/h)下的摩擦系数,对于摆式摩擦仪测得的BPN,需通过转换得到。转换公式为:

$$F_{60} = A + B \times F_{R60} \quad (2)$$

式中, F_{R60} 是摆式摩擦仪在特定滑动速度(S)下测得的BPN转换到60 km/h的摩擦系数,计算涉及指数修正:

$$F_{R60} = F_{RS} \times e^{(S-60)/S_p} \quad (3)$$

F_{RS} 是摆式摩擦仪在实测滑动速度 S (通常为10 km/h)下测得的BPN值(需除以100转换为摩擦系数); A 和 B 是摆式摩擦仪的标定参数,根据PIARC标准,常用值 $A = 0.07784$, $B = 0.00709$ 。

需要注意的是:①上述参数(a, b, A, B)基于PIARC标准,实际应用中可以根据具体设备和方法进行标定;②MTD的单位为mm,BPN需转换为摩擦系数(即BPN/100)后再参与计算;③BPN受路面温度影响,若非标准温度(20℃),需按规范修正后再使用。

根据PIARC标准,基于其他类型检测设备测得的摩擦系数和构造深度计算滑动速度数(S_p)和摩擦系数(F_{60})的公式与式(1)、式(2)相类似。理论上讲,路面上同一点的抗滑性能应该是相同的,因此,IFI_{MTD,BPN}(F_{60}, S_p) = IFI_{MPD,SFC}(F_{60}, S_p)。其中,MPD和SFC分别为激光断面仪和横向力系数车测得的路面表面构造深度和横向力系数(摩擦系数)。这样就可以构建起室内外路面抗滑性能的相互关联关系。

1.3 基于IFI的沥青路面抗滑标准

按我国现行沥青路面设计规范(JTG D50—2017),对多雨地区高速公路沥青路面的抗滑性能要求: $SFC_{60} \geq 54$, $MTD \geq 0.55$ mm,推算出BPN和MTD指标为: $BPN \geq 50$ (对应式(3) $F_{RS} = 0.5$), $MTD \geq 0.55$ mm。由摆式摩擦仪滑动速度 $S = 10$ km/h及上述公式,可以得出基于IFI(F_{60}, S_p)的多雨地区高速公路沥青路面的抗滑性能要求为:IFI(0.079, 50.88)。

1.4 基于IFI的路面抗滑性能评价与改进

路面的抗滑性能可采用IFI(F_{60}, S_p)进行评价。如果以规范规定的抗滑指标为最小值IFI_{min},则可以制定沥青混合料设计阶段针对路面抗滑性能的最低质量要求,MTD_{min}和BPN_{min},以及加速加载试验后,路面抗滑性能衰减状况。同时,通过图2所示的IFI分区图可以准确分析影响路面抗滑性能及性能衰减的主要因素,这对于实现科学精准的沥青混合料设计和路面养护方案的制定具有重要意义。

基于IFI(F_{60}, S_p)模型,可将图2中的区域划分成4个部分。①区域A:BPN和MTD均

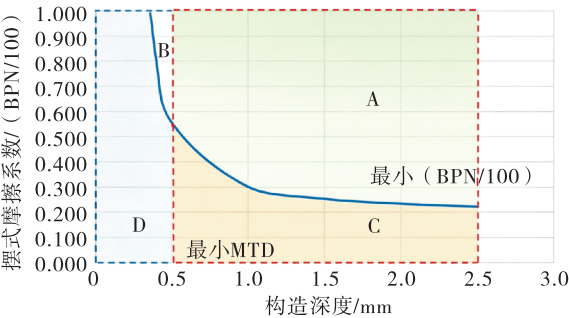


图 2 基于路面抗滑性能最低要求的 IFI 分区图

较高，表示路面抗滑性能良好，无需改进；②区域 B：MTD 值较小（路面构造深度不足），建议改善路面纹理以提升抗滑性能；③区域 C：BPN 值较小（路面摩擦系数不足），建议改善沥青面层集料或级配以增加摩擦系数；④区域 D：BPN 和 MTD 均较小，表示路面抗滑性能较差，需同时改善纹理和摩擦特性。

2 沥青混合料设计与性能评价

2.1 原材料与级配

结合实际工程的混合料目标配合比设计，选择了三种 SMA - 13 混合料的级配类型：粗（SMA1）、中（SMA2）和细（SMA3），具体如下表 2 所示。以此考察级配对 SMA 抗滑性能的影响，并探索在沥青混合料设计阶段开展抗滑性能优化的可行性及其对长期性能的影响。

表 2 三种 SMA - 13 混合料的级配

筛孔尺寸/ mm	通过各筛孔混合料的质量百分率/%				
	SMA1	SMA2	SMA3	下限	上限
16	100	100	100	100	100
13.2	92	95	98	90	100
9.5	53	63	70	50	75
4.75	22	27	30	20	34
2.36	17	21	24	15	26
1.18	16	19	20	14	24
0.6	14	16	16	12	20
0.3	12	13	14	10	16
0.15	11	11	11	9	13
0.075	10	10	10	8	12

试件的制作采用南粤牌 SBS 改性沥青（PG76 - 16），粗细集料为河源产辉绿岩石料，填料为石灰岩矿粉和普通硅酸盐水泥（P · O 42.5），纤维为德国木质素纤维。所有原材料均满足相关规范的技术要求。

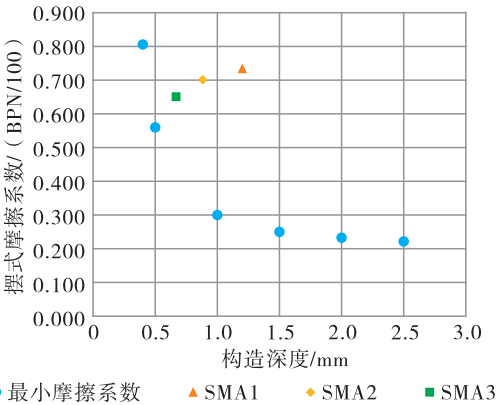
2.2 三种 SMA - 13 混合料的性能试验

三种 SMA - 13 混合料的马歇尔试验结果如表 3 所示。

表 3 SMA - 13 混合料的马歇尔试验结果

性能检测指标	SMA1	SMA2	SMA3	技术要求
孔隙率 VV/%	4.2	3.8	3.2	3 ~ 4
矿料间隙率 VMA/%	17.15	17.83	17.57	≥17.0
沥青饱和度 VFA/%	75.8	79.8	81.3	75 ~ 85
马歇尔稳定度/kN	7.4	6.7	6.05	≥6.0
流值/0.1 mm	34.2	33.4	35.05	—
浸水残留稳定度/%	93.8	95.1	96.3	≥80
冻融劈裂强度比/%	97.1	95.9	99.2	≥80
析漏损失/%	0.075	0.054	0.069	≤0.1
飞散损失/%	8.2	10.3	4.5	≤15
动稳定度/（次/mm）	>6 000	>6 000	>6 000	≥3 000
摆式摩擦系数（BPN/100）	0.73	0.70	0.65	≥0.50
构造深度/mm	1.2	0.88	0.67	≥0.55
最佳油石比/%	6.1	6.15	6.22	—

从表 3 可以看出，三种类型混合料的摆式摩擦系数和构造深度均呈现出明显的变化。摩擦系数的变化与最佳油石比及沥青膜厚度相关，因为三种混合料采用的粗细集料完全相同；而构造深度的变化则与级配有关，其中粗级配混合料表现出更大的构造深度。将三组 SMA - 13 混合料的摩擦系数和构造深度数据绘制到图 2 中，结果如图 3 所示。由图 3 可见，三种混合料的初始综合抗滑性能均处于 A 区，但各类型的性能储备存在明显差异。



3 三种 SMA - 13 混合料初始综合抗滑性能对比

2.3 三种 SMA - 13 混合料长期抗滑性能的加速加载试验评价

沥青路面抗滑性能快速衰减是道路行业的一大痛点。经常有高速公路交工验收抗滑性能检测合格率为 100%，竣工验收检测的合格率却不足 30%，而两次检测只间隔了两到三年（《公路工程竣（交）工验收办法》）。从路面养护工作实践中也可以发现，大量路面通常因抗滑性能不足而启动矫正性养护或预防性养护程序。从这个意义

上讲,在沥青混合料配合比设计阶段开展长期抗滑性能的试验评价是十分必要的。

长期以来,道路行业对路面长期性能的研究主要依赖于试验路及试验路段的加速加载试验。然而,试验路存在观测周期长、局限性明显(交通量、环境、材料、工艺、施工条件等均不可控)、成本高等一系列问题。而现有加速加载设备的加载轮主要以拖曳方式运动,无法模拟真实轮胎与路面表面的相互作用(包括滚动摩擦与滑动摩擦)。

本研究采用的驱动轮式路表面功能加速加载试验系统不仅可以真实模拟轮胎与路表面的相互作用,同时还考虑了轮胎下沥青混合料试件(0~4 cm)厚度范围内的应力分布与标准轮载作用工况一致,能够反映长期重复荷载作用下材料各组成要素重构对抗滑性能的影响,进而真实模拟车轮荷载对路表面的作用效果。已有研究结合试验路面和加速加载试验,建立了有效轮载作用次数与抗滑性能衰减之间的关系模型,证实室内加速加载试验的结果与实际路面检测结果高度相关^[7-15]。因此,在沥青混合料配合比设计阶段采用该驱动轮式路表面功能加速加载试验系统来评价和优化路面长期抗滑性能可能,是最优的技术路径。

图4和图5展示了不同 SMA-13 混合料试件在加速加载试验过程中抗滑性能的变化趋势。由图可知,随着车轮荷载作用次数的增加,各类型混合料的摩擦系数和构造深度均呈从快速衰减到逐渐稳定态势;三种混合料的摩擦系数在荷载作用前5万次均呈现“先增后减”的油膜影响阶段,与实际路面表现一致;构造深度的衰减似乎比摩擦系数更快一些,荷载作用10万次后基本趋于稳定,而摩擦系数的衰减要到25万次后才趋于稳定;初始摩擦系数和构造深度大的混合料,其稳定值也趋向于更大一些,即抗滑耐久性会更好一些。

图6为三种 SMA-13 混合料的初始和长期综合抗滑性能对比。从图中可以看出,经过20万次重复荷载作用后,只有 SMA1 位于 IFI 分区图中的区域 A,满足规范要求,且抗滑性能良好;SMA2 处于规范要求的边缘;SMA3 不满足规范的要求。这表明初始抗滑性能(摩擦系数和构造深度)较大的混合料(如 SMA1),其长期抗滑耐久性更优,而级配偏细的混合料(如 SMA3)在长期荷载作用下,即使在相同的抗滑

性能衰减速率下,其稳定后的抗滑性能也难以满足使用要求。该结果也验证了在沥青混合料设计阶段通过优化级配(如采用粗级配)可确保路面长期抗滑性能方面的可行性和必要性。

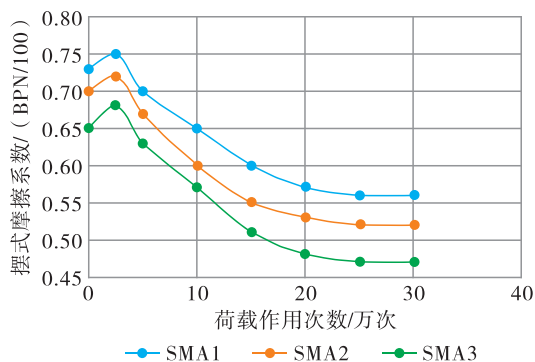


图4 摆式摩擦系数随荷载作用次数衰减状况

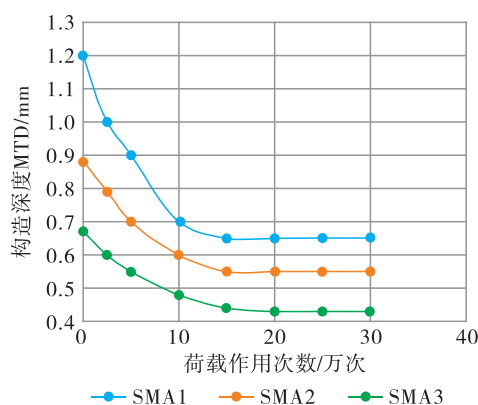


图5 构造深度随荷载作用次数衰减状况

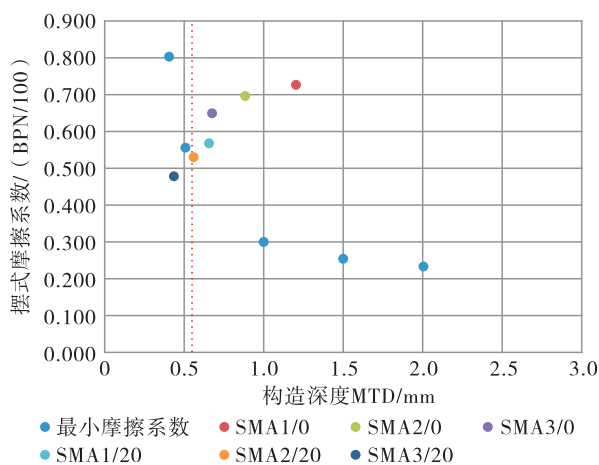


图6 三种 SMA 混合料初始和长期综合抗滑性能对比

3 结论

鉴于路面抗滑的重要性,以及路面抗滑性能快速衰减带来的一系列问题,本研究基于沥青路面抗滑性能的可设计性和国内外近年来在沥青路

面抗滑设计方面的成果,探讨在沥青混合料配合比设计阶段应用室内路面功能驱动轮式加速加载系统评价和优化沥青混合料抗滑性能的可行性和效果,以及室内外抗滑性能检测和评价的关联方法。主要结论如下:

(1) 基于驱动轮式路面功能加速加载试验系统和国际摩擦指数 (IFI) 建立的室内外抗滑性能关联方法,可有效实现沥青混合料设计阶段的抗滑性能评价与优化,为路面抗滑耐久性设计提供了科学手段。

(2) 沥青混合料的级配对长期抗滑性能影响显著:粗级配 (如 SMA1) 在加速加载试验后仍能保持较高的摩擦系数和构造深度稳定值,长期抗滑耐久性最优,满足规范要求;而细级配 (如 SMA3) 在长期荷载作用后的抗滑性能稳定值难以满足路面的长期使用要求。

(3) 在沥青混合料设计阶段,通过沥青混合料的优化设计 (如采用粗型级配),可显著提升路面初始抗滑性能及长期抗滑储备,削减因抗滑性能不足引发的养护工作量,降低全寿命周期成本。

需要说明的是,路面的抗滑性能检测与评价主要以摩擦系数和构造深度为指标。因此,作为一种方法,本研究中提出的“基于驱动轮式路面功能加速加载试验系统和国际摩擦指数 (IFI) 建立的室内外抗滑性能关联方法”理论上应该不仅适用于 SMA 体系的沥青混合料,也适用于其他类型沥青混合料,如密级配沥青混合料 (AC 类) 和多空隙沥青混合料 (PAC 或 OGFC 类) 等。未来,将结合实际工程开展其他类型沥青混合料抗滑性能评价、优化和验证工作。

参考文献:

- [1] MCGOVERN C, RUSCH P, NOYCE D A. State practices to reduce wet weather skidding crashes[R]. Washington D. C. : Federal Highway Administration, 2011:5.
- [2] 中华人民共和国交通部. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004[S]. 北京:中华人民共和国交通部, 2005.
- [3] KOWALSKI K, MCDANIEL R, OLEK J. Identification of laboratory technique to optimize superpave HMA surface friction characteristics[R]. Washington D. C. : Federal Highway Administration, 2010:10.
- [4] AASHTO. Guidelines for skid resistant pavement design [S]. Washington D. C. : American Association of State Highway and Transportation Officials, 1976.
- [5] LIU X Y, LUO H Y, CHEN C, et al. A technical survey on mechanism and influence factors for asphalt pavement skid-resistance[J]. Friction, 2024, 12 (5):845-868.
- [6] 雷超旭. 路面表面功能加速加载系统研究[D]. 广州:华南理工大学, 2010.
- [7] 孙晓立, 张肖宁, 蔡旭. 基于加速加载试验的微表处长期路用性能[J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2012, 40 (5):691-695.
- [8] 梁何浩, 丁蓬勃, 钱琪, 等. 渗固型沥青混凝土路面封层性能室内试验评价[J]. 公路, 2015, 60 (11):202-207.
- [9] 区仕权, 王端宜. 橡胶沥青碎石封层试验评价[J]. 科学技术与工程, 2011, 11 (19):4660-4664.
- [10] CAI X, WANG D Y, YU J M. Evaluation of the functional performance of paving materials based on the driving wheel pavement analyzer[J]. Applied Sciences, 2020, 10 (7):1-16.
- [11] 徐驰. 湿热地区重交通道路沥青路面抗滑性能衰减机理与改善措施研究[D]. 广州:华南理工大学, 2022.

(上接第6页)

- [12] KHAN S, SHEIKH N, MCCARTHY J, et al. Experimental investigation on foam concrete without and with recycled glass powder: A sustainable solution for future construction[J]. Construction and Building Materials, 2019, 201:369-379.
- [13] YIWEN W, CHAO L, HUAWEI L, et al. Pore structure and durability of green concrete containing recycled powder and recycled coarse aggregate[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 53:104435.
- [14] YING X, ZHAO X, CUI H, et al. Recycled glass concrete with cementitious materials: Study of

mechanical prediction model and dry shrinkage mechanism[J]. Construction and Building Materials, 2024, 438:137159.

- [15] LU J, YAN X, HE P, et al. Sustainable design of pervious concrete using waste glass and recycled concrete aggregate[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 234:1102-1112.
- [16] JING X, PEIMIN Z, WEI Z, et al. Design and assessment of eco-friendly ultra-high performance concrete with steel slag powder and recycled glass powder[J]. Powder Technology, 2023, 419:118164.