

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.

LIU Ya-min, WANG Lei, YANG Zhen. Attenuation law and prediction model of skid-resistance performance of asphalt pavement[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2023, 43(5): 1-10.

DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2023.05.001

沥青路面抗滑性能衰减规律及预测模型

刘亚敏¹, 汪磊¹, 杨振²

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068)

摘要: 为了定量描述沥青路面在全寿命周期内抗滑性能衰减规律, 利用自主研发的多因素加速加载磨耗设备(MAAM), 从材料角度出发, 对不同条件下沥青混合料抗滑性能衰减规律进行分析, 并依据 Asymptotic 模型拟合得到沥青混合料抗滑性能的衰减函数; 采用灰色关联理论, 基于集料形貌参数和力学指标研究集料相关参数对抗滑性能评价指标的影响程度。以灰关联度分析结果为基础、以摆值为抗滑指标优选影响程度较高的主要参数, 进行多元线性拟合分析, 建立沥青路面抗滑性能预测模型。研究表明: 棱角性好、磨光值高、磨耗值低的集料可有效提高沥青路面抗滑耐久性; 粗集料所占比例是影响沥青路面抗滑性能衰减幅度、初值和终值的主要因素, 尤其是公称最大粒径为 9.5~16 mm 的集料, 细集料的占比对沥青路面抗滑衰减速率影响显著, 通过调整粗细集料的比例, 可以有效提高沥青路面的抗滑性能; 集料的公称最大粒径对沥青路面初始抗滑性能影响显著, 但对沥青路面抗滑稳定终值、衰减幅度和衰减速率的影响有限; 与密级配相比, 间断级配和开级配沥青混合料可以表现出更为优异的抗滑性能。

关键词: 道路工程; 抗滑性能; 灰色关联分析; 衰减规律; 预测模型

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-8879(2023)05-0001-10

Attenuation law and prediction model of skid-resistance performance of asphalt pavement

LIU Ya-min¹, WANG Lei¹, YANG Zhen²

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University,

Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. CCCC No.1 Highway Survey Design & Research

Institute Co. Ltd., Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: In order to quantitatively describe the skid-resistance performance attenuation law of asphalt pavement in the whole life cycle, a self-developed multiple accelerated abrasion machine (MAAM) was used for analysing the decay pattern of asphalt mixture skid-resistance performance under different conditions from a material perspective. And the skid-resistance performance attenuation function of asphalt mixture according to the Asymptotic model fitting was obtained. The gray correlation theory was used for studying the degree of influence of

收稿日期: 2022-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608048); 陕西省交控集团科技项目(19-10K)

作者简介: 刘亚敏(1980-), 女, 河北保定人, 副教授, 工学博士, E-mail: liuyamin@chd.edu.cn。

aggregate-related parameters on the evaluation indexes of skid-resistance performance based on aggregate morphology parameters and mechanical indexes. Based on the results of the gray correlation analysis, the pendulum value as the skid-resistance index was preferred to the main parameters with high degree of influence, and the multivariate linear fitting analysis was carried out to establish the prediction model of skid-resistance performance of asphalt pavement. The results show that the aggregates with good angularity, high polishing value and low abrasion value can effectively improve the skid resistance durability of asphalt pavement. The proportion of coarse aggregate is the main factor affecting the attenuation range, initial value and final value of skid resistance of asphalt pavement, especially the 9.5 to 16 mm aggregate. The proportion of fine aggregate has a significant effect on the rate of skidding attenuation of asphalt pavement, and by adjusting the proportion of coarse and fine aggregate, the skid-resistance performance of asphalt pavement can be effectively improved. The nominal maximum particle size of aggregate has significant influence on the initial skid resistance of asphalt pavement, but has limited influence on the final value, attenuation amplitude and attenuation rate of the skid resistance stability of asphalt pavement. Compared with dense graded asphalt mixture, discontinuous graded asphalt mixture and open graded asphalt mixture show better skid resistance. 15 tabs, 5 figs, 21 refs.

Key words: road engineering; skid-resistance performance; grey relational analysis; attenuation law; prediction model

0 引 言

路面抗滑性能是评估行车安全的重要指标^[1-2]。而路面纹理及其构造在汽车轮胎不断磨耗的过程中,路面抗滑性能下降,严重影响了道路的行驶安全^[3]。因此路面抗滑性能衰减规律及预测是一项不可忽视的研究。

目前,路面抗滑性能预测模型的研究依旧处于定性研究阶段,大多是通过不同的室内加速磨耗设备,研究抗滑性能的演变规律^[4-6]。文献[5]利用研制的 W-S 磨光机,在试验过程中喷洒磨耗介质以加速磨耗,该设备可以得到摩擦因数与速度(20~80 km/h)的关系。黄云涌等研发的直线式加速加载仪和室内大型直道是一种典型的足尺直道试验,相比车辙模拟试验,该设备能较好地模拟轮胎的荷载作用及行车速度,但轮胎的运动方式与实际情况稍有差异^[7]。李东海研发了轮胎驱动式路面功能加速加载试验设备,该设备可通过操控其他装置(紫外光照、喷淋装置、温控装置等)模拟环境因素对沥青路表特性的影响^[8]。迟坤东通过自主研发的加速磨光试验仪进行加速磨光试验,研究了粗集料的掺配方式对路面构造及抗滑性能的影响,但未对粗集料掺配前后其抗滑性能的变化规律进行详尽研究^[9]。童锦尧通过轮胎-路面动态摩擦分析仪,模拟不同断面

深度、速度、滑移率、荷载下的胎路摩擦作用,并推导出了沥青路面摩擦因数预估模型,但并未考虑温度对摩擦因数的影响^[10]。

在沥青路面抗滑性能影响因素研究中,刘明智使用不同磨光介质设计污染物组合,模拟真实受污染沥青路面的抗滑性能演变规律,并研究了路面摩擦因数迟滞分量与黏附分量随温度的变化,但未探讨 2 种分量与磨耗次数的关系^[11]。李东海基于搓揉车辙试验仪,以构造深度和摩擦因数为评价指标,对 GAC-13C、AC-13 两种沥青混合料进行抗滑性能评价,并采用不同经验公式对构造深度、摆值进行回归拟合,但其研究的沥青混合料级配种类较少,影响抗滑性能的因素考虑不够全面^[8]。廖亦源通过在现场不同温度条件下实测摆值,建立温度与摆值的关系,提出关于摆值的温度修正模型,并依据实测沥青路面的摩擦因数和构造深度,对比分析不同级配时的抗滑性能衰变规律,但该试验路段的抗滑性还处于衰减中,未到最终的衰减稳定值,得出的结果不全面^[12]。徐自生通过动态摩擦测试系统,在车速、滑移率、荷载、级配等条件下,研究沥青路面抗滑性能的影响因素,并根据路面的宏观及微观纹理,研究沥青路面抗滑性能和路表纹理的相关性,发现宏观纹理参数(平均断面深度、平均构造深度、轮廓算术平均偏差、轮廓均方根偏差)与路面摩擦因数具有良好

的相关性^[13]。Rezaei 等通过分析影响路面抗滑值的因素,研发一种关于沥青路面抗滑性能与集料特征、集料级配、交通量的预测模型^[14]。Kassem 等在实验室中制备不同沥青混合料的试件板,并用轮式抛光设备抛光,在不同抛光间隔后测量试件板表面的摩擦特性,并将摩擦特性与集料特性进行统计分析,研究沥青路面抗滑性能和集料特性的相关性^[15]。Fwa 等通过数值模拟与仿真方法建立轮胎、水膜和路面的多元耦合模型,主要研究了水膜厚度对胎路接触作用的影响,揭示了在水流影响下的胎路摩擦机理,但缺少真实试验数据验证^[16-18]。

许多学者主要集中行驶条件、环境因素和沥青混合料级配对沥青路面抗滑性能影响的定性描述和定量分析,少有学者基于路面磨耗全过程探究路面抗滑性能演变规律,很难建立全寿命周期的沥青路面抗滑性能预测模型^[19-20]。因此,本文通过不同类型集料(玄武岩、花岗岩、闪长岩、石灰岩)、不同级配、不同公称最大粒径条件下成型路面板,然后使用笔者课题组自主研发的加速加载磨耗设备,进行不同磨耗阶段的路面抗滑性能演变规律及拟合研究,最后通过灰关联分析优选出主要影响参数,建立基于混合料特性的抗滑性能预测模型,以期为预防路面抗滑能力失效、提高路面抗滑性能提供科学、有效的指导建议。

1 原材料及试验方案设计

1.1 原材料

1.1.1 沥青

本文所使用的沥青为 90# 普通基质沥青,其技术指标见表 1。

表 1 沥青技术指标

Tab. 1 Technical indexes of asphalt

检测项目	数值
针入度(25 ℃,100 g,5 s)/0.1 mm	91.3
软化点/℃	49
动力黏度(60 ℃)/(Pa·s)	163
动力黏度(135 ℃)/(Pa·s)	0.5
延度(5 ℃,5 cm·min ⁻¹)/cm	25.2
密度(15 ℃)/(g·cm ⁻³)	1.010

1.1.2 集料

试验采用闪长岩(产地为河北武安)、石灰岩(产地为陕西咸阳)、花岗岩(产地为山东济南)和玄武岩(产地为甘肃兰州)4 种集料,分析集料类型对沥青路面抗滑性能衰减规律,按照《公路沥青路面施工技

术规范》(JTG F40—2004)及《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)中相关规定对集料的技术性能进行试验,结果见表 2。

表 2 集料技术指标

Tab. 2 Technical indexes of aggregates

集料性能	玄武岩	闪长岩	花岗岩	石灰岩	规范要求
棱角性	41.6	38.6	49.0	34.5	≥30.0
磨耗值/%	11.7	19.6	15.7	19.3	≤28.0
磨光值	53.9	46.6	48.2	42.7	≥40.0
压碎值/%	8.6	22.8	13.8	19.8	≤26.0

1.2 试验方案设计

1.2.1 沥青混合料板件成型

本文选用 50 cm(长)×50 cm(宽)×5 cm(高)的试模尺寸成型沥青混合料试件,试件通过手推式小型振动压路机压实成型,选择尺寸较大的板件有利于抗滑性能测试的精准性。沥青混合料板件制备主要流程如下:

(1)拌和。该尺寸的板件所需混合料质量大约为普通车辙板[30 cm(长)×30 cm(宽)×5 cm(高)]的 3 倍,普通小型混合料拌和锅每次拌和质量有限,因此将每块板件分 3 次拌和,1 次拌和结束后将混合料装盆并在 170 ℃恒温烘箱中保温,3 次拌和完成后再保温 30 min 准备摊铺。

(2)摊铺。将试模放入提前切割好的水泥试模槽,便于压路机碾压成型。在试模内摊铺报纸并在内壁均匀涂抹煤油。之后将烘箱内的混合料按照“先中间后四周”的原则分批次缓慢倒入试模内,用插捣棒将混合料插捣密实,并用刮刀刮平表面。

(3)碾压成型。采用手推式小型振动压路机对沥青混合料进行压实,控制压实温度为 155 ℃,压实次数为往返 25 次。

(4)脱模。碾压结束后将板件静置 24 h,待混合料温度降至室温后,在平整的地板上脱模并在室内平板上放置,减小温度变异导致板件弯曲变形。

1.2.2 加速加载磨耗试验

(1)磨耗设备

为研究沥青路面磨耗过程中抗滑性能的演变规律,采用笔者课题组研发的多因素加速磨耗设备(multiple accelerate abrasion machine,MAAM)进行磨耗试验,如图 1 所示。

MAAM 的磨耗轮通过位移传感器和气泵实现运行,当磨耗轮运动到左端被传感器识别后,气泵给磨耗轮施加气压,磨耗轮在曲柄驱动下提升并移动到右端,路面在此过程中不被磨耗;当磨耗轮移动

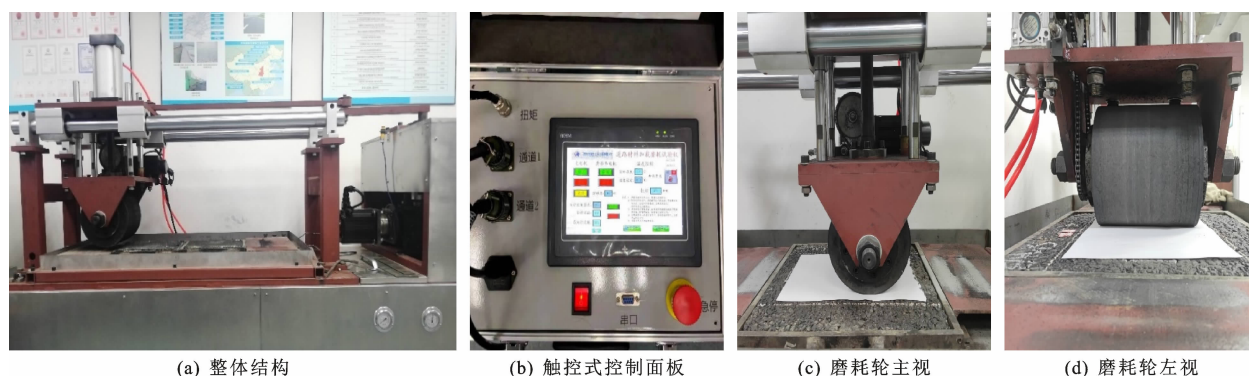


图1 加速加载磨耗设备 MAAM

Fig. 1 Multiple accelerated abrasion machine

到右端后,气泵使磨耗轮下降并在曲柄的驱动下使其在路面板上磨耗,磨耗轮磨耗 1 次后运动到左端被再次抬起,以此往复运动。磨耗轮的各项技术指标参数、MAAM 试验设置参数如表 3、表 4 所示。

表 3 磨耗轮及橡胶层技术参数

Tab. 3 Technical parameters for abrasive wheels and rubber layers

参数	磨耗轮 宽度/mm	磨耗轮 直径/mm	橡胶层 厚度/mm	磨耗 温度/℃
数值	320	245	50	25

表 4 MAAM 试验设置参数

Tab. 4 Setup parameters of MAAM

参数	数值	参数	数值
磨耗轮接地压力/MPa	0.7	主电机转速/($r \cdot \min^{-1}$)	25
磨耗轮运行速度/ ($\text{次} \cdot \text{h}^{-1}$)	750	减速电机转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	21
气泵压力/MPa	0.3	滑移率/%	15

试验磨耗过程中定间隔撒布过 0.6 mm 筛孔的金刚砂磨料来加速磨耗,每磨耗 1 000 次撒布 1 次 150 g 金刚砂。因 OGFC 沥青混合料试件空隙大,金刚砂磨料会流到空隙而减弱加速磨耗效果,为了使不同沥青混合料试件的磨耗程度相同,在进行 OGFC 板件的加速磨耗试验时,适当地增加金刚砂量。

(2) 试验终止条件

试验选用 AC-13 和 SMA-13 两块板件,采用 t 检验对磨耗 24 000、30 000 次的试件抗滑指标平均断面深度 (MPD) 进行显著性分析,结果如表 5 所示。

可见,经过 24 000、30 000 次磨耗后,AC-13 路面的 MPD 的 t 小于其 95% 的置信区间的临界值,显著性水平 P 为 0.410,远大于 0.05;SMA-13 路面的 MPD 的 t 小于其 95% 的置信区间的临界值,显著性水平 P 为 0.395,也远大于 0.05。故可得出,

沥青混合料路面板在磨耗 24 000 次的基础上继续磨耗至 30 000 次,MPD 的变化不再显著,因此本文将加速加载磨耗设备 MAAM 的试验终止条件确定为磨耗 24 000 次。

表 5 磨耗终止次数显著性分析

Tab. 5 Significance analysis of abrasion termination times

混合料	t		P (双侧)	
	统计值	临界值	统计值	临界值
AC-13	1.302	2.571	0.410	0.05
SMA-13	2.052	2.571	0.395	

(3) 抗滑性能测试

以每 2 000 次作为磨耗节点,通过摆式仪对沥青路面板的每个磨耗节点进行抗滑测试。

1.2.3 影响因素及方案设计

(1) 集料类型

考虑到集料棱角性、磨耗值、磨光值、压碎值对沥青混合料抗滑性能的影响,选取玄武岩、花岗岩、石灰岩和闪长岩分别成型沥青路面板,研究不同集料类型的路面抗滑性能衰减规律。

(2) 最大公称粒径

最大公称粒径是沥青路表构造的主要影响因素。故本文中分别选取公称最大粒径为 9.5、13.2、16 mm 的集料成型沥青路面板进行分析。

(3) 级配

不同级配类型的沥青路面存在构造差异,其抗滑性能也有所不同。本文中选取密级配沥青混合料 (AC)、间断级配混合料 (SMA) 以及开级配沥青混合料 (OGFC) 3 种典型的沥青混合料来研究其对沥青路面抗滑性能的影响。

具体试验设计方案如表 6 所示,表 6 中每种沥青混合料各成型 3 个沥青路面板,以保证试验顺利进行且有足够的数据量。

试验中涉及到的沥青混合料级配如表 7 所示。

表 6 试验方案设计
Tab. 6 Test scheme design

集料因素			沥青因素		
材料类型	公称最大粒径/mm	级配	材料类型	油石比/%	空隙率/%
闪长岩、石灰岩、花岗岩、玄武岩	13.2	AC	90# 基质沥青	5.0	4.5
闪长岩	9.5	AC	90# 基质沥青	5.0	4.4
	13.2				4.5
	16.0				4.7
闪长岩	13.2	AC	90# 基质沥青	5.0	4.5
		SMA		6.1	3.4
		OGFC		5.2	20.2

2 结果与分析

2.1 加速加载试验结果

沥青混合料试件的不规则微观构造和沥青胶浆在磨耗作用下逐渐被磨平、磨光,该过程中岩石和沥青表现出疲劳开裂,并以块状、层状或粉末状的形式

表 7 沥青混合料级配设计

Tab. 7 Gradations design of different asphalt mixture

混合料类型	不同筛孔孔径(mm)下的通过率/%									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC-10	100	100	95	61	43	31	23	15	12	6
AC-13	100	95	78	52	38	26	18	13	10	6
AC-16	95	84	70	47	35	26	17	14	9	6
SMA-13	100	95	63	26	20	19	15	14	12	10
OGFC-13	100	95	71	23	16	13	11	8	6	4

脱落。图 2 为沥青混合料磨耗过程。

2.2 抗滑性能衰减规律分析

2.2.1 集料类型

对不同集料类型的 AC13 沥青路面板进行加速加载磨耗试验,每磨耗 2 000 次采集抗滑数据以获得不同集料类型的抗滑性能衰减情况。不同集料类型下沥青路面板抗滑性能衰减曲线如图 3 所示。图 3 中横向虚线,参考了《公路沥青路面养护技术规范》(JTG 5142—2019)中微表处工程验收的摆值要求。由图 3 可以看出:

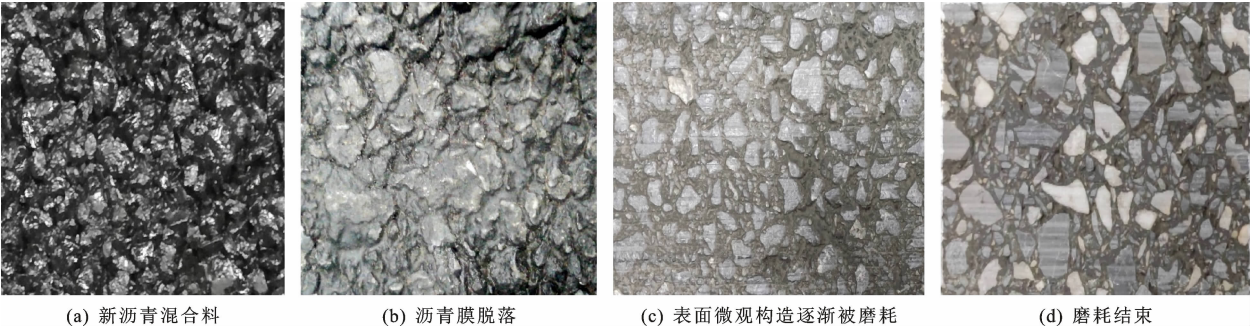


图 2 沥青混合料磨耗过程
Fig. 2 Abrasion process of asphalt mixture

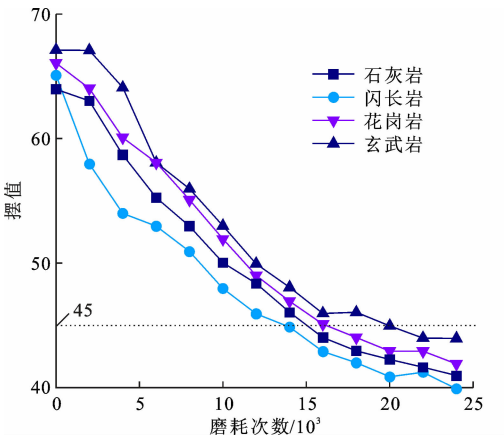


图 3 不同集料类型沥青混合料抗滑性能衰减曲线
Fig. 3 Skid-resistance performance attenuation curves of asphalt mixture with different aggregate types

(1)4 种 AC-13 沥青路面板试件的摆值变化规律相似度较高。随着磨耗次数的增加,抗滑衰减速

率不断减小。

(2)当磨耗次数约为14 000时,闪长岩混合料的摆值开始不能满足规范要求,当磨耗次数约为 20 000时,玄武岩混合料才出现抗滑性能失效。不同集料类型的沥青路面抗滑性能由大到小排序为玄武岩、花岗岩、石灰岩、闪长岩。

分析其原因,根据表 2,玄武岩和花岗岩的各力学指标都明显优于石灰岩和闪长岩,沥青混合料所用集料的力学指标(棱角性、磨耗值、磨光值、压碎值)对沥青路面抗滑性能存在影响,导致 4 种集料成型的沥青混合料的初始摆值与最终摆值有明显差异。

2.2.2 公称最大粒径

利用闪长岩分别成型 AC-10、AC-13、AC-16 沥青路面板,分析公称最大粒径对路面抗滑性能的影响,不同沥青路面板摆值衰减情况如图 4 所示。

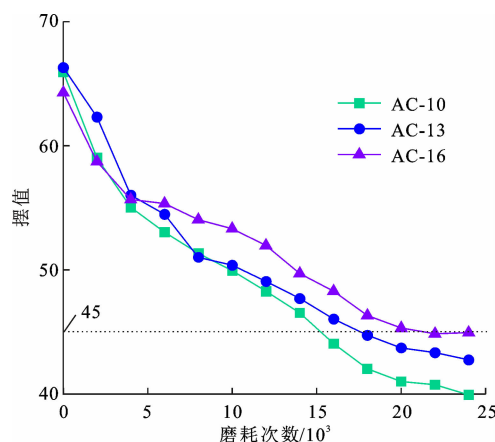


图4 不同公称最大粒径沥青混合料抗滑性能衰减曲线

Fig. 4 Skid-resistance performance attenuation curves of asphalt mixture with different nominal maximum particles size

由图4可以看出:在磨耗初期(磨耗次数为6 000前)各类沥青路面抗滑性能衰减迅速,但其抗滑性能差异不明显,衰减曲线高度重合。磨耗中期(磨耗次数为6 000~16 000)各类型沥青路面抗滑衰减速率逐渐降低;且AC-16早在磨耗次数为5 000左右时抗滑衰减速率就明显降低,与AC-10、AC-13拉开差距。磨耗后期(磨耗次数为16 000后)各类沥青路面抗滑性能衰减速率进一步降低,抗滑性能衰减幅度较为平缓,但各沥青路面的抗滑性能差异也达到最大。表明集料公称最大粒径越大,路面抗滑性能越好。

分析其原因,集料粒径对路面表面纹理构造影响明显,进一步影响轮胎与路面接触面积,导致其抗滑性能的差异。沥青混合料路表的宏观、微观构造对路面抗滑性能影响显著,沥青混合料的公称最大粒径越大,越容易形成大空隙,形成良好的宏观纹理,微观构造由沥青用量、细集料、集料结构、环境因素等影响,故磨耗初期路面抗滑性能无明显规律性;随着磨耗次数的增加,路表微观构造磨损严重,使得混合料粒径对路面抗滑性能的影响愈发显著。

2.2.3 级配

通过AC, SMA, OGFC三种沥青路面分析不同级配路面的抗滑性能衰减规律,不同沥青路面板的摆值随磨耗次数的变化如图5所示。

通过图5可以看出,随着磨耗次数的增加,AC路面的摆值降至45以下,其次是OGFC路面,最后是SMA路面。尽管SMA路面的抗滑性能在磨耗前期较差,但随着磨耗次数增加,其抗滑性能逐渐超过AC和OGFC路面。表明OGFC路面的抗滑能力在磨耗前中期表现优异,AC路面抗滑耐久性最

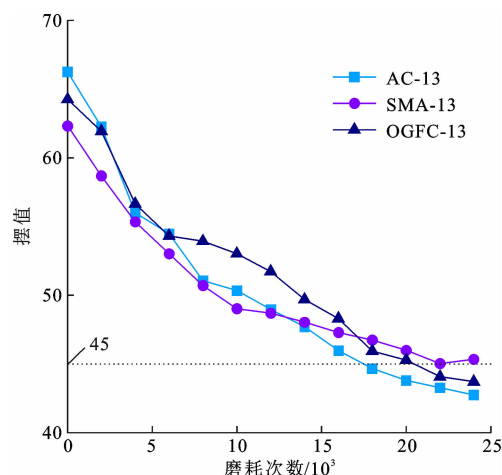


图5 不同级配沥青混合料抗滑性能衰减曲线

Fig. 5 Skid-resistance performance attenuation curves of asphalt mixture with different gradations

差, SMA路面的抗滑耐久性最好。

分析其原因,级配是调整混合料颗粒空间分布状态的指标。SMA的显著特征“三多一少”,较AC和OGFC路面容易形成丰富的宏、微观纹理,促进其抗滑衰减率较小,使得在同样磨耗条件与环境条件下, SMA路面表现出更为优异的抗滑耐久性和抗滑稳定性。

2.3 抗滑性能拟合分析

为进一步描述并量化路面抗滑性能衰减规律,本文基于Asymptotic回归模型对不同类型沥青路面进行拟合分析。Asymptotic模型的基本公式为

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

式中: x 为磨耗次数; y 为抗滑指标(摆值); A 为衰减幅度,是路面板未开始磨耗时与磨耗结束时两者摆值的差值; C 为路面的抗滑终值,是路面板磨耗结束时的摆值; $A+C$ 为路面抗滑初值,是路面板未开始磨耗时的摆值。

抗滑性能衰减率计算如下

$$B = -\frac{A}{A+C} \times 100\% \quad (2)$$

式中: B 为衰减速率。

每种沥青混合料各成型3个试件且每个试件隔2 000磨耗次数测1次摆值,因此每种沥青混合料抗滑性能拟合共有39组数据,计算得到不同集料类型、不同公称最大粒径、不同级配的沥青混合料的拟合结果及相关系数 R^2 如表8和表9所示。

由表8可知:4种集料类型的沥青路面板中衰减幅度最小的是玄武岩,衰减幅度最大的是石灰岩,二者衰减幅度相差7%;4种沥青路面板整个磨耗过程的抗滑衰减速率从小到大依次为花岗岩、玄武岩、

表 8 沥青路面板抗滑性能衰减模型回归系数

Tab. 8 Regression coefficients of skid-resistance attenuation model of asphalt pavement slab

材料类型	A	B	C	A+C	R ²
闪长岩	31.118	-8.61×10 ⁵	36.786	67.904	0.994
石灰岩	32.063	-9.42×10 ⁵	34.531	66.595	0.987
玄武岩	30.026	-8.15×10 ⁵	38.327	68.352	0.988
花岗岩	31.278	-8.00×10 ⁵	36.592	67.870	0.992

表 9 不同级配沥青路面板抗滑性能衰减模型回归系数

Tab. 9 Regression coefficients of skid-resistance performance attenuation of different asphalt pavement slab with different gradation

混合料类型	A	B	C	A+C	R ²
AC-10	28.227	-7.82×10 ⁵	35.867	64.095	0.983
AC-13	25.246	-1.04×10 ⁴	40.888	66.133	0.992
AC-16	22.722	-1.18×10 ⁴	40.153	62.874	0.965
SMA-13	18.070	-1.20×10 ⁴	44.191	62.261	0.996
OGFC-13	26.093	-7.68×10 ⁵	38.966	64.059	0.996

闪长岩、石灰岩;4 种沥青路面板的抗滑初值差异不明显,但因 4 种集料本身的性能差异,其衰减速率也不同,说明集料类型直接影响了路面抗滑性能。

分析表 9 得到以下结论:

(1)对于同样的路面级配类型,公称最大粒径越大,路面的抗滑衰减幅度越小,衰减速率越小,抗滑终值越大。其中,AC-10 与 AC-16 沥青路面板抗滑性能变化差异极显著,前者的抗滑衰减速率接近后者的 2 倍。

(2)不同的路面级配类型在抗滑性能上表现出不同优势。密级配沥青混合料的初始抗滑性能最好;开级配沥青混合料抗滑性能衰减最慢;间断级配沥青混合料耐磨性最好。同密级配路面相比,间断级配和开级配路面具有更为出色的抗滑性能。

综合表 8 和表 9 可知,拟合结果的相关系数都大于 0.96,拟合相关性高,因此使用 Asymptotic 回归模型能很好地反映沥青路面抗滑性能衰减规律。

2.4 抗滑性能关键参数分析

灰色关联度分析法(grey relation analysis, GRA)是一种多因素统计分析方法^[21]。为准确找出影响路面抗滑性能参数:抗滑初值(A+C)、抗滑终值(C)、抗滑衰减率(B)、抗滑衰减幅度(A)的主要指标,采用灰色关联分析法进行影响因素甄选,优选出对路面抗滑性能参数敏感的材料指标。灰色关联分析步骤如下:

(1)根据评价目的确定评价指标体系,收集评价

数据。设 n 个数据序列形成如下矩阵

$$(X'_1, X'_2, \dots, X'_n) = \begin{bmatrix} x'_1(1) & \cdots & x'_n(1) \\ \vdots & & \vdots \\ x'_1(m) & \cdots & x'_n(m) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: m 为指标的个数;元素 $X'_i = (x'_i(1), x'_i(2), \dots, x'_i(m))^T$;评价对象 $i = 1, 2, \dots, n$ 。

(2)确定参考序列

参考序列应该是一个理想的比较标准,可以以各指标的最优值(或最劣值)构成参考序列,也可以根据评价目的选择其他参考值。记作

$$X'_0 = (x'_0(1), x'_0(2), \dots, x'_0(m)) \quad (4)$$

(3)对指标数据进行量纲一化

量纲一化后的数据序列形成如下矩阵

$$(X_0, X_1, \dots, X_n) = \begin{bmatrix} x_0(1) & \cdots & x_n(1) \\ \vdots & & \vdots \\ x_0(m) & \cdots & x_n(m) \end{bmatrix} \quad (5)$$

(4)逐个计算每个被评价对象指标序列(比较序列)与参考序列对应元素的绝对差值,即 $|x_0(k) - x_i(k)|, (k = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n)$ 。

(5)由上述结果确定 $\min_{1 \leq i \leq n} \min_{1 \leq k \leq m} |x_0(k) - x_i(k)|$ 与 $\max_{1 \leq i \leq n} \max_{1 \leq k \leq m} |x_0(k) - x_i(k)|$ 。

(6)计算关联系数

由式(3)~式(6),分别计算每个比较序列与参考序列对应元素的关联系数 $\xi_i(k)$,即

$$\xi_i(k) = [\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho^* \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|]^{-1} [x_0(k) - x_i(k) + \rho^* \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|]^{-1} \quad (6)$$

式中: ρ^* 为分辨系数,在(0,1)内取值,若 ρ^* 越小,关联系数间差异越大,区分能力越强,通常 ρ^* 取 0.5。

(7)计算关联度

对各评价对象(比较序列)分别计算其各指标与参考序列对应元素关联系数的均值,反映各评价对象与参考序列的关联关系,并称其为关联度 r_i ,记为

$$r_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \xi_i(k) \quad (7)$$

2.4.1 集料技术指标分析

集料技术指标选取磨光值、磨耗值、压碎值及棱角性,沥青路面抗滑指标选取摆值,基于抗滑性能衰减规律建立抗滑初值、抗滑终值、抗滑衰减率、抗滑衰减幅度与粗集料指标的灰色关联,分析集料相关技术指标对路面抗滑性能的影响程度,灰关联度计算结果见表 10。

表 10 集料技术指标灰关联度

Tab. 10 Grey correlation degree of aggregate types

参数	不同集料技术指标下的灰关联度			
	磨光值	磨耗值	压碎值	棱角性
抗滑初值	0.853	0.728	0.614	0.895
抗滑终值	0.776	0.611	0.548	0.762
抗滑衰减速率	0.543	0.617	0.531	0.614
抗滑衰减幅度	0.651	0.624	0.602	0.741

分析表 10 可知:相较于磨耗值和压碎值,集料的棱角性和磨光值对沥青路面的抗滑初值和抗滑终值影响较大。对于抗滑衰减率,4 种集料属性的灰关联度都不高,集料的磨耗值和棱角性对抗滑衰减速率有一定影响。集料的棱角性对沥青路面的抗滑衰减幅度有一定影响。

2.4.2 公称最大粒径

路面抗滑指标选取摆值,相关参数选取公称最大粒径分别为 16、13.2、9.5 mm,基于抗滑性能衰减规律建立抗滑初值、抗滑终值、抗滑衰减速率、抗滑衰减幅度与集料粒径的灰色关联,分析公称最大粒径对路面抗滑性能的影响程度,灰关联度计算结果见表 11。

表 11 公称最大粒径灰关联度

Tab. 11 Gray correlation degree of nominal maximum particle sizes

参数	不同公称最大粒径(mm)下的灰关联度		
	16	13.2	9.5
抗滑初值	0.871	0.686	0.557
抗滑终值	0.623	0.795	0.722
抗滑衰减速率	0.624	0.589	0.551
抗滑衰减幅度	0.672	0.621	0.549

分析表 11 可知,公称最大粒径越大,与沥青路面的抗滑性能参数的灰关联度越大,对沥青路面的抗滑性能参数影响越大,说明适当增大集料的公称最大粒径,可以提高沥青路面的抗滑性能,特别是沥青路面的初始抗滑性能,但对沥青路面抗滑稳定终值、衰减幅度和衰减速率的影响有限。

2.4.3 级配组成分析

级配组成相关参数选取 0.075~16 mm 筛孔的通过率,基于抗滑性能衰减规律建立抗滑初值、抗滑终值、抗滑衰减速率、抗滑衰减幅度与集料级配的灰

色关联,分析级配对路面抗滑性能的影响程度,灰关联度计算结果见表 12。

表 12 级配组成灰关联度

Tab. 12 Grey correlation degree of gradation compositions

参数	不同筛孔孔径(mm)通过率下的灰关联度									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
抗滑初值	0.952	0.897	0.893	0.682	0.693	0.645	0.661	0.671	0.632	0.635
抗滑终值	0.890	0.904	0.880	0.654	0.664	0.636	0.668	0.678	0.649	0.638
衰减速率	0.687	0.664	0.680	0.653	0.674	0.714	0.766	0.762	0.821	0.761
衰减幅度	0.830	0.788	0.813	0.734	0.744	0.663	0.682	0.691	0.636	0.632

由表 12 可知,粗集料和细集料用量对路面抗滑性能影响较大。以通过率差值来表征不同档位的用量大小。其中粒径为 0.15 与 1.18 mm 集料的通过率差值 $\Delta_{1.18-0.15}$ 对沥青路面抗滑衰减速率影响较大。粒径为 9.5 与 16 mm 集料的通过率差值 $\Delta_{16-9.5}$ 对沥青路面初始抗滑性能、衰减幅度、抗滑终值影响较大。

2.5 抗滑衰减预测模型建立

以摆值为抗滑指标,结合集料的棱角性、磨耗值、磨光值以及 $\Delta_{16-9.5}$ 、 $\Delta_{1.18-0.15}$ 等主要影响因素,再利用 SPSS 分析软件对抗滑衰减参数进行多元拟合,选取相关性最优的系数建立沥青路面抗滑性能预测模型。

2.5.1 衰减幅度拟合

将衰减幅度进行多指标拟合分析,并将对衰减幅度有显著影响的集料棱角性、磨耗值、 $\Delta_{16-9.5}$ 等作为主要指标,结果见表 13。

由表 13 得到衰减幅度的最优拟合结果,如式 8 所示

$$A=-0.227U+0.044Q+4.184\Delta_{16-9.5}+18.086\Delta_{1.18-0.15}-364.601 \quad (8)$$

式中: U 为集料棱角性; Q 为集料磨耗值。

2.5.2 衰减速率拟合

将衰减速率进行多指标拟合分析,并将对衰减速率有显著影响的集料棱角性、磨耗值、 $\Delta_{1.18-0.15}$ 等作为主要指标,结果见表 14。

由表 14 得到衰减速率的最优拟合结果,如式 9 所示

$$B=1.963\times10^{-6}U-1.170\times10^{-7}Q-$$

表 13 沥青路面抗滑衰减幅度多指标拟合分析系数

Tab. 13 Multi index fitting analysis coefficients of skid-resistance attenuation amplitude of asphalt pavement

指标	棱角性	磨光值	磨耗值	压碎值	$\Delta_{16-9.5}$	$\Delta_{1.18-0.15}$	常数项	R^2
数值	-2.251	1.269	0.000	0.000	-0.078	0.000	56.908	0.373
	-0.227	0.000	0.044	0.000	4.184	18.086	-364.601	0.956
	-1.379	-0.322	0.000	-0.812	-0.095	0.000	114.002	0.512
	-0.012	-0.322	0.000	-0.113	4.122	17.830	-348.228	0.925

表 14 沥青路面抗滑衰减速率多指标拟合分析系数

Tab. 14 Multi index fitting analysis coefficients of skid-resistance attenuation rate of asphalt pavement

指标	棱角性	磨光值/ 10^6	磨耗值	压碎值/ 10^6	$\Delta_{16-9.5}/10^5$	$\Delta_{1.18-0.15}$	常数项	R^2
数值	5.76×10^6	0.00	3.29×10^6	0.00	0.000	-2.63×10^6	0.000 00	0.602
	7.65×10^6	-2.55	1.86×10^6	0.00	0.000	-2.59×10^6	0.000 00	0.598
	5.51×10^6	0.00	5.54×10^6	-1.76	0.000	-2.61×10^6	0.000 00	0.715
	1.96×10^6	0.00	-1.17×10^7	0.00	-1.510	-6.61×10^5	0.001 31	0.816

$$1.510 \times 10^{-5} \Delta_{16-9.5} - 6.613 \times 10^{-5} \Delta_{1.18-0.15} + 0.001\ 31 \quad (9)$$

$$3.357 \Delta_{1.18-0.15} + 89.761 \quad (10)$$

式中: P_{SV} 为集料磨光值。
由预测模型[式(1)]得到以下结论:

2.5.3 抗滑终值拟合

将抗滑终值进行多指标拟合分析,并将对抗滑速率有显著影响的集料棱角性、磨光值、 $\Delta_{16-9.5}$ 等指为主要指标,结果见表 15。

由表 15 得到衰减终值的最优拟合结果,如式 10 所示

$$C=0.499U+0.018P_{SV}-0.704\Delta_{16-9.5}-$$

- (1)棱角性越好,磨耗值越小,粗集料占比越大,细集料占比越小,衰减幅度越小;
- (2)棱角性越好,磨耗值越小,粗集料占比越大,细集料占比越小,衰减速率越小;
- (3)棱角性越好,磨光值越大,粗集料占比越大,细集料占比越小,抗滑终值越大。

表 15 沥青路面抗滑终值多指标拟合分析系数

Tab. 15 Multi index fitting analysis coefficients of final value of skid-resistance attenuation of asphalt pavement

指标	棱角性	磨光值	磨耗值	压碎值	$\Delta_{16-9.5}$	$\Delta_{1.18-0.15}$	常数项	R^2
数值	0.889	-0.238	0.000	0.000	0.090	0.000	12.103	0.913
	0.648	0.215	0.000	0.227	0.093	0.000	-4.448	0.949
	0.499	0.018	0.000	0.000	-0.704	-3.357	89.761	0.991

3 结 语

(1)集料的棱角性和磨光值对沥青路面抗滑性能参数影响显著,优选棱角性好、磨光值大、磨耗值小的集料可以显著提高沥青路面的抗滑性能。

(2)集料的公称最大粒径对沥青路面初始抗滑性能影响显著,但对沥青路面抗滑稳定终值、衰减幅度和衰减速率的影响有限。

(3)粗集料的占比对沥青路面抗滑性能初值、衰减幅度和终值影响显著;细集料的占比对沥青路面抗滑衰减速率影响显著。通过调整粗细集料的比例,可以有效提高沥青路面的抗滑性能。同时也验证了间断级配的沥青混合料比密级配和开级配的沥青混合料抗滑性能更优异。

(4)在基于 Asymptotic 模型拟合沥青路面抗滑性能衰减函数的基础上,以摆值为抗滑指标,结合集料的棱角性、磨光值、磨耗值以及 $\Delta_{16-9.5}$ 、 $\Delta_{1.18-0.15}$ 等主要影响因素,建立了沥青路面抗滑性能衰减规律多元拟合的预测模型。

(5)本文计算得到的沥青路面抗滑性能衰减预测模型未考虑环境因素及沥青的影响,在后续研究中将增加试验工作量,考虑不同环境及不同沥青类型、用量等参数变化对沥青路面抗滑性能的影响。

参考文献:

References:

[1] 宁斌权. 沥青路面抗滑性能衰变规律及修复技术研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2018.
NING Bin-quan. Study on the decay law and repair technology of asphalt pavement skid resistance[D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2018.

[2] 黄晓明,郑彬双. 沥青路面抗滑性能研究现状与展望[J]. 中国公路学报,2019,32(4):32-49.
HUANG Xiao-ming, ZHENG Bin-shuang. Research status and progress for skid resistance performance of asphalt pavements[J]. China Journal of Highway and Transport,2019,32(4):32-49.

[3] 秦浪朝. 路面摩擦系数的检测与评价方法的研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2015.
QIN Lang-chao. The detection of pavement friction coefficient and the research of its evaluation methods [D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2015.

[4] 钱朝清. 国外沥青路面抗滑性能影响因素研究[J]. 城市道桥与防洪,2019(2):165-167,20.
QIAN Chao-qing. Study on factors influencing skid resistance of asphalt pavement abroad [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2019 (2): 165-167,20.

- [5] 王永平,黄维蓉.室内沥青路面抗滑性能衰减规律研究及模型分析综述[J].中外公路,2015,35(3):299-302.
WANG Yong-ping, HUANG Wei-rong. Summary of research and model analysis on attenuation law of anti-skid performance of indoor asphalt pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(3): 299-302.
- [6] 余苗,童铈尧,孔令云,等.轮胎-沥青路面摩擦测试及抗滑模型研究综述[J].公路交通科技,2020,37(10):12-24.
YU Miao, TONG Shi-yao, KONG Ling-yun, et al. A review of tire-asphalt pavement friction measurement and skid resistance model study[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(10): 12-24.
- [7] 黄云涌,邵腊庚,刘朝晖.沥青路面抗滑试验研究[J].公路交通科技,2002,19(3):5-8.
HUANG Yun-yong, SHAO La-geng, LIU Zhao-hui. Laboratory test study on antiskid property of asphalt pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 19(3): 5-8.
- [8] 李东海.基于搓揉试验的沥青路面抗滑性能研究[D].广州:华南理工大学,2013.
LI Dong-hai. Research on the anti-slide performance of asphalt pavement in kneading experiment[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [9] 迟坤东.集料掺配对沥青路面构造特征及抗滑性能的影响[D].重庆:重庆交通大学,2016.
CHI Kun-dong. The influence of blending aggregate on the structural characteristics and anti sliding performance of asphalt pavement[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [10] 童铈尧.考虑路表纹理特性的轮胎-沥青路面动态接触摩擦行为仿真研究[D].重庆:重庆交通大学,2020.
TONG Shi-yao. The simulation study on the dynamic friction behaviors of tire-asphalt pavement: Considering the characteristics of pavement texture[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020.
- [11] 刘明智.环境因素对沥青路面抗滑性能影响研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
LIU Ming-zhi. Research of environmental factors on the asphalt pavement anti-sliding performance impact[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [12] 廖亦源.基于足尺环道的沥青路面抗滑性能衰减规律的研究[D].重庆:重庆交通大学,2019.
LIAO Yi-yuan. Research on regularity of skid resistance regradation of asphalt pavement based on full-scale pavement loop[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [13] 徐自生.基于沥青路面表观纹理特征的路面摩擦抗滑机理研究[D].重庆:重庆交通大学,2019.
XU Zi-sheng. Study on skid resistance mechanism of pavement friction based on apparent texture characteristics of asphalt pavement[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [14] REZAEI A, MASAD E, CHOWDHURY A. Development of a model for asphalt pavement skid resistance based on aggregate characteristics and gradation[J]. Journal of Transportation Engineering, 2011, 137(12): 863-873.
- [15] KASSEM E, AWED A, MASAD E A, et al. Development of predictive model for skid loss of asphalt pavements[J]. Transportation Research Record, 2013(2372): 83-96.
- [16] FWA T F. Skid resistance determination for pavement management and wet-weather road safety[J]. International Journal of Transportation Science and Technology, 2017, 6(3): 217-227.
- [17] FWA T F. Determination and prediction of pavement skid resistance-connecting research and practice[J]. Journal of Road Engineering, 2021, 1(1): 43-62.
- [18] PASINDU H R, FWA T F, ONG G P. Analytical evaluation of aircraft operational risks from runway rutting[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2016, 17(9): 810-817.
- [19] 廖勇,任涛,刘丹.沥青路面抗滑性能影响因素识别研究进展[J].交通节能与环保,2021,17(1):124-128.
LIAO Yong, REN Tao, LIU Dan. Research progress on identification of factors influencing skid resistance of asphalt pavement[J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2021, 17(1): 124-128.
- [20] 朱洪洲,廖亦源.沥青路面抗滑性能研究现状[J].公路,2018,63(1):35-46.
ZHU Hong-zhou, LIAO Yi-yuan. Present situations of research on anti-skid property of asphalt pavement[J]. Highway, 2018, 63(1): 35-46.
- [21] 何俊辉,陈海涛,赵艳娜,等.基于灰关联法的沥青路面抗滑性能影响因素研究[J].中外公路,2020,40(6):47-52.
HE Jun-hui, CHEN Hai-tao, ZHAO Yan-na, et al. Study on factors influencing antiskid performance of asphalt pavement based on grey relational analysis[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(6): 47-52.