

沥青混合料温控磨光机的研制及其实验教学应用

康爱红^{1,2}, 张焱^{1,2}, 李波^{1,2*}, 龚泳帆^{1,2}, 吴正光^{1,2}

1.扬州大学建筑科学与工程学院, 江苏 扬州 225127

2.江苏省玄武岩纤维复合建筑材料工程研究中心, 江苏 扬州 225127

摘要: 为深入理解沥青路面抗滑性能衰减规律, 研制了一种沥青混合料温控磨光机, 该装置由三相电机带动橡胶轮在试件表面滚动、摩擦, 达到模拟实际路面轮胎磨光效果。结合沥青路面抗滑衰减的实际工程问题, 通过长期加载、阶段测量的形式, 开展了不同工况下的抗滑性能实验。结果表明, 采用高磨光值的粗集料、添加玄武岩纤维能够显著提升沥青混合料的抗滑耐久性。该装置具有温度可调控, 加载便捷、实验效率高等优点, 学生可根据工程实际工况自行设置实验方案, 丰富了现有沥青路面抗滑性能实验的教学内容, 有助于提升学生的实践创新能力, 在土木工程材料教学和研究、相关研究院及企事业单位的应用前景广阔。

关键词: 沥青混合料; 温控磨光机; 抗滑性能; 影响因素; 实验教学

Research and Development of Temperature-controlled Polishing Machine for Asphalt Mixture and Its Application in Experimental Teaching

Kang Aihong^{1,2}, Zhang Yao^{1,2}, Li Bo^{1,2*}, Gong Yongfan^{1,2}, Wu Zhengguang^{1,2}

1.College Of Architectural Science And Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225127

2.Jiangsu Province Basalt Fiber Composite Building Materials Engineering Research Center, Yangzhou, Jiangsu 225127

Abstract: In order to further understand the anti-skid performance deterioration of asphalt pavement, a temperature-controlled asphalt mixture polishing device has been developed. This device uses a three-phase motor to drive a rubber wheel to roll and rub on the surface of the test specimen, simulating the actual tire-polishing effect on the road surface. In combination with the practical engineering problem of anti-skid deterioration of asphalt pavement, anti-skid performance experiments under different conditions were carried out through long-term loading and stage measurement. The results show that the use of coarse aggregates with high polishing values and the addition of basalt fiber can significantly improve the skid resistance and skid durability of asphalt mixtures. This device has the advantages of temperature adjustable, convenient loading, and high experimental efficiency. Students can set up their own experimental plans based on the actual working conditions of the project. This device can enrich the existing teaching content of asphalt pavement skid resistance experiments, contribute to enhancing students' practical innovation ability, and has broad application prospects in civil engineering materials teaching and research, related research institutes, and enterprises and institutions.

Keywords: asphalt mixture; temperature-controlled polishing machine; anti-skid performance; influencing factors; experimental teaching

引言

路面抗滑性能是道路行车安全的重要指标。在车轮的持续磨耗作用下, 路面构造深度及其纹理逐渐变小, 路面抗滑能力随之下降, 进而影响道路的行驶安全^[1,2]。因此, 研究路面抗滑性能的衰减规律, 探明其影响因素, 对于建设高品质道路、改善行车安全、具有重要意义^[3,4]。此外, 路面抗滑性能也是《沥青与沥青混合料》《道路检测与养护》等专业课程的重要实验教学内容^[5]。

沥青路面抗滑性能与其宏观构造及微观纹理密切相关^[6]。国内外学者利用各种方法探究了抗滑性能的影响因素及其变化规律。Ueckermann A等提出基于光学纹理测量的非接触式新型防滑性测量概念, 探讨了影响沥青混合料长期防滑性能的关键因素^[7,8]。王大为^[9]等通过考虑骨料的形态特征和矿物学特征, 研究了集料抛光和磨损对路面长期抗滑性能的影响。高茜楠^[10]等分析了分形理论在路面

基金项目: 中国建设教育协会教育教学科研课题(2023028、2023244); 江苏省学位与研究生教育教学改革课题(JGKT23_C088); 扬州大学校教学改革研究课题(YZUJX2021-D15)。

作者简介: 康爱红(1973—), 女, 江苏如东, 博士, 教授, 博士生导师, 现主要从事道路工程研究与教学。

通信作者: 李波(1982—), 男, 湖南郴州, 博士, 副教授, 硕士生导师, 现主要从事土木工程材料研究与教学。

抗滑级配设计和抗滑集料筛选中的应用,各自给出了抗滑性能提升方法新思路。曹东伟^[11]等制备了集料混掺的超薄磨耗层沥青混合料,利用三轮磨耗仪对试件表面进行加速模拟磨耗试验,探究了抗滑特性随磨耗次数的衰减规律。结果表明,由于不同集料间的“纹理构造差”可能有效降低抗滑性能衰减速率。刘亚敏^[12]等利用自主研发的多因素加速加载磨耗设备,对不同条件下沥青混合料抗滑性能衰减规律进行了分析,结果表明,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。余苗^[13]等采用激光轮廓测量仪和路面动态摩擦系统,研究了不同交通量下路表纹理的变化,结果表明,重载区域下路面的磨耗约严重,抗滑性能下降越快。何玉林^[14]等在实际轮胎载荷的基础上开发了高速摩擦试验设备,研究了不同载荷条件下,密级配和开级配沥青混合料抗滑性能的变化规律。上述研究为沥青混合料抗滑性能改善提供了依据,但开发的设备仍存在荷载加载繁琐、对实验温度考虑不足等问题。

针对上述问题,开发了一种沥青混合料温控磨光机,其采用橡胶轮与真实混合料试件开展实验,具有温度可调控、加载便捷、磨光均匀和试验效率高等优点。在沥青混合料抗滑性能实验教学中,能够引导学生设计与实际工况接近的实验方案,分析沥青混合料抗滑性能影响因素,提出改善措施,有助于培养学生利用沥青混合料专业知识解决道路工程问题的能力。

一、温控磨光机设计

温控磨光机主要由温度环境箱、框架、传动机构、荷载机构(含橡胶轮)、电气控制盒、提升装置等部件构成,如图1、图2所示。



>图1 温控磨光机示意图



>图2 温控磨光机实物图

(1) 温度环境箱①: 尺寸为85mm×85mm×1000mm; 温度在0~80℃范围内可调节; 通过温控箱的隔离, 实现运行过程中无明显噪声。

(2) 框架(2): 由4个M35的碳钢螺杆, 一块800mm×800mm×20mm, 一块800mm×800mm×15mm和3块800mm×40mm×10mm的不锈钢板组成。

(3) 传动机构: 含速比1:30的减速机(3)和转速1400r/min的三相电机(4)。

(4) 荷载机构: 含4个橡胶轮(5), 一块恒定荷载盘(6)以及不同配重的荷载块(7)。恒定荷载盘直径400mm, 厚45mm, 对轮胎的静态应力达到0.7Mpa; 通过增加不同的配重荷载块, 可使应力在0.7~1.4MPa范围内调节。橡胶实心轮直径100mm, 轮面宽25mm; 4个轮子中心与恒定荷载盘圆心的半径分别相差25mm, 这样测试得到的轮子轨道宽度约为10cm; 通过回转式滚动设计, 达到均匀施加荷载的效果。

(5) 电气控制盒(8): 搭载时间继电器, 可以按需求设置实验时间。

(6) 提升装置(9): 配备1.5t提升锁扣, 方便取样和放样。

二、温控磨光机使用步骤

温控磨光机的转动动力来源由三相电机提供, 经减速机进行转速控制; 通过主轴连接下方的恒定荷载盘, 荷载盘下方连接4个实心橡胶轮。实验时, 实心橡胶轮放置在沥青混合料试件表面。

由于电机转动, 橡胶轮在试件表面滚动、摩擦。长期加载后, 试件表面出现橡胶轮加载过的车辙痕迹, 从而达到模拟实际路面轮胎磨光效果。

使用时实施步骤如下所述:

(1) 将成型好的沥青混合料试件, 放置在温度环境箱内;

(2) 开启温度环境箱, 设置所需要的温度, 进行养护, 养护时间根据需求而定, 通常为5小时;

(3) 待达到养护温度后, 开启电机, 设置磨光时间。时间达到后, 电机会自动停止;

(4) 磨光过程中, 每隔30min, 需在试件表面添加10ml水;

(5) 磨光完成后, 将试件取出, 根据《公路路基路面现场检测规程》(JTG3450-2019)中规定的摆式仪测定路面摩擦系数方法(T0964-2008)^[15], 测试试件的摆值; 使用激光纹理扫描仪, 具体过程可参见文献, 测试试件平均构造深度(Mean Texture Depth, MTD)。

三、温控磨光机实验教学应用

实验教学要求学生了解沥青混合料抗滑性能衰减规律, 理解其影响因素并提出抗滑改善措施。利用沥青混合料温控磨光机, 设计了不同粗集料、外掺剂和玄武岩纤维等多组对比实验, 帮助学生利用科学方法来研究和分析路面抗滑性能, 培养其实践创新能力。

(一) 实验方案设计

以SMA-13沥青混合料级配为例, 通过高磨光值粗集料替代、加入外掺剂、添加玄武岩纤维等方式, 制备了多组沥青混合料试件开展对比实验, 以探明不同因素对路面抗滑性能的影响, 方案设计见表1。

表1 抗滑性能实验方案设计

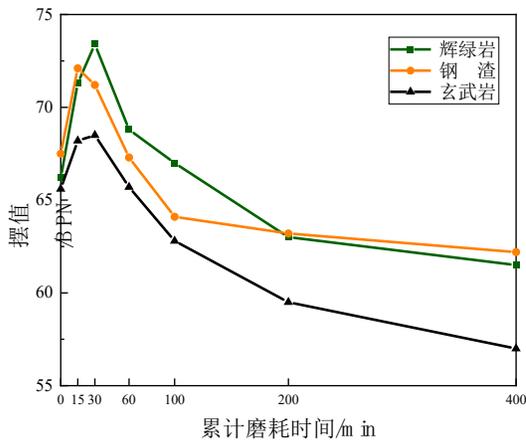
方案	材料	磨耗时间 /min	检测指标
方案1粗集料替代	辉绿岩、钢渣、玄武岩	0、15、30、60、100、200、400	摆值 平均构造深度
方案2添加外掺剂	抗滑剂、高模量剂、高黏剂		
方案3添加纤维	玄武岩纤维		

(二) 实验结果分析

1. 粗集料对沥青混合料抗滑性能影响

以玄武岩集料制备的 SMA-13 沥青混合料试件作为对比样，将粗集料分别替换成高磨光值的钢渣、辉绿岩制成试件，使用温控磨光机进行模拟车轮磨耗试验，到达设定时间后即测试该阶段的摆值和平均构造深度。摆值结果见图 3 所示。

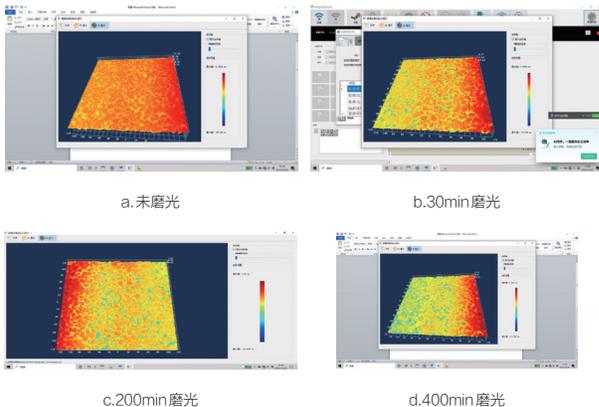
从图 3 可以看出，不同粗集料沥青混合料的摆值 BPN 整体变化趋势均呈现三个阶段：上升阶段（0-30min）；下降阶段（30-200min），平缓阶段（200-400min）。这是由于在磨耗早期（0-30min），试件表面沥青膜脱落，部分尖锐的集料棱角显露出来，导致了试件摆值升高。在下降阶段（30-200min），集料逐渐被压平、磨光，导致试件表面摆值不断下降，抗滑性能随之衰减；在平缓阶段（200-400min），集料已基本被磨光，试件表面摆值下降缓慢，抗滑性能趋于稳定。



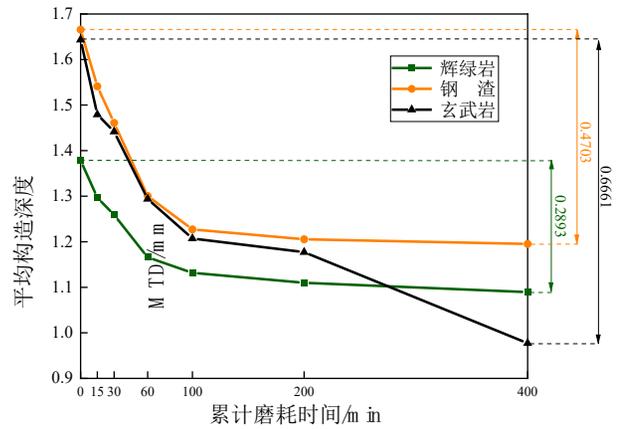
> 图 3 不同种类粗集料沥青混合料各磨耗阶段摆值 BPN

此外，辉绿岩、钢渣、玄武岩三种不同类型粗集料沥青混合料，其抗滑系数初始值差别不大，分别为 66.2、67.5、65.6BPN。实验结束后，三者的抗滑终值分别为 61.5、62.2 和 57.0BPN，辉绿岩和钢渣沥青混合料的接近，比玄武岩沥青混合料的提高了约 5BPN。可见，采用辉绿岩或者钢渣替代玄武岩粗集料，能够大幅提升沥青混合料的抗滑耐久性。

沥青混合料激光纹理图（以辉绿岩为例）如图 4 所示，平均构造深度（Mean Texture Depth, MTD）变化曲线如图 5 所示，其中，MTD 最大值与最小值的差值表示其衰减幅度。



> 图 4 辉绿岩沥青混合料激光纹理图

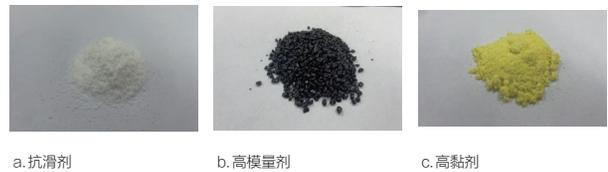


> 图 5 不同种类粗集料沥青混合料各磨耗阶段平均构造深度 MTD

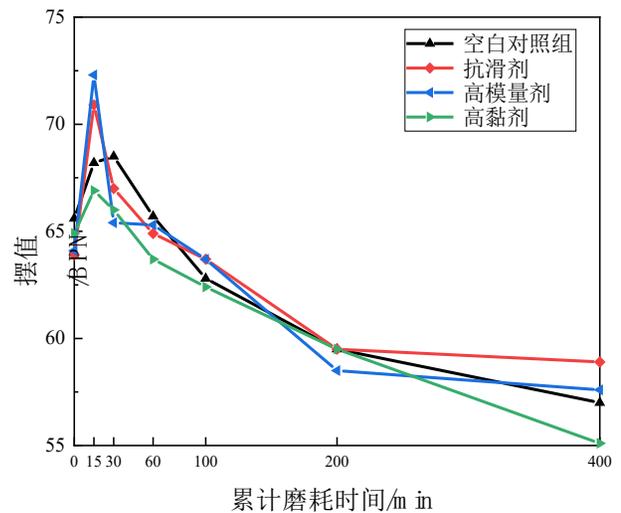
从图 5 可知，不同沥青混合料的平均构造深度 MTD 呈现先急速衰减，后缓慢变化的现象。其中，辉绿岩沥青混合料经多轮磨光后，其平均构造深度 MTD 的衰减幅度最小，仅为 0.2893，远小于玄武岩沥青混合料的 0.6661，表明其具有较强的抗滑稳定性，这与摆值的实验结果相一致。

2. 外掺剂对沥青混合料抗滑性能影响

本试验选择抗滑剂、高模量剂、高黏剂三种高聚物外掺剂（如图 6），制备沥青混合料试件，外掺剂掺量为混合料质量的 3%。使用温控磨光机进行模拟车轮磨耗试验，到达设定时间后即测试该阶段的摆值 BPN 和平均构造深度 MTD，摆值结果见图 7 所示。



> 图 6 外掺剂实物照片

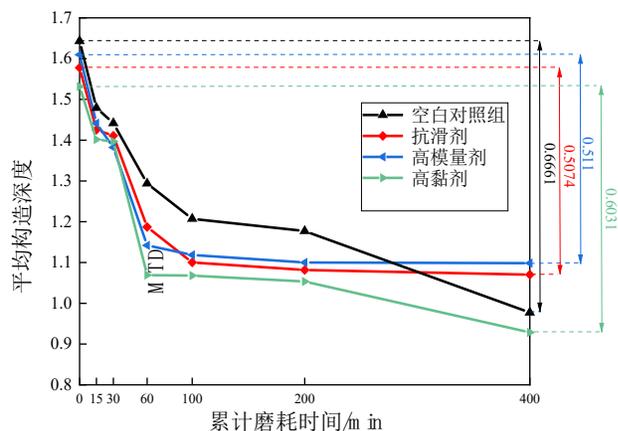


> 图 7 不同外掺剂沥青混合料各磨耗阶段摆值 BPN

从图 7 可以看出，添加抗滑剂和高模量剂后，沥青混合料的抗滑峰值由空白组的 68.5BPN 分别提升到了 70.9BPN 和 72.3BPN，但摆值达到峰值后，又迅速衰衰减至与初始值附近，最终趋于稳定后的抗滑终值则较空白组的略高。可见，添加抗滑剂和高模量

剂对于短期内提升混合料的抗滑系数具有积极效果,但其长期抗滑性能影响不大。而高黏剂的加入导致混合料的抗滑系数初值以及终值略有降低,表明其难以提升混合料的抗滑性能。

不同外掺剂沥青混合料对应的平均构造深度 MTD 结果如图 8 所示。

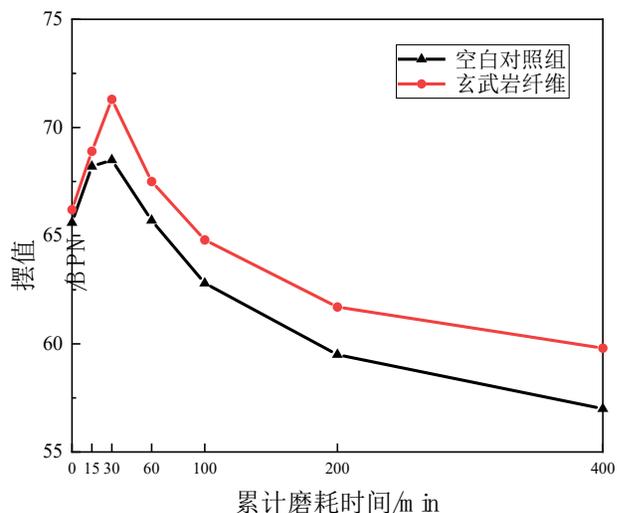


> 图 8 不同外掺剂下沥青混合料各磨耗阶段平均构造深度 MTD

由图 8 可知,三种高聚物外掺剂混合料在不同磨耗阶段的平均构造深度 MTD 均呈现逐步下降的现象,但最终衰减幅度均与空白组的较为接近,表明加入高聚物外掺剂对混合料的抗滑性能的影响有限。总体而言,三种高聚物外掺剂对沥青混合料的抗滑性能提升幅度不大。这是因为车轮对沥青混合料的磨光损伤以集料磨光为主,而高聚物外掺剂的加入,能够增加沥青的黏度和强度,但沥青混合料抗滑性能的提升仍取决于集料的抗磨光性能。

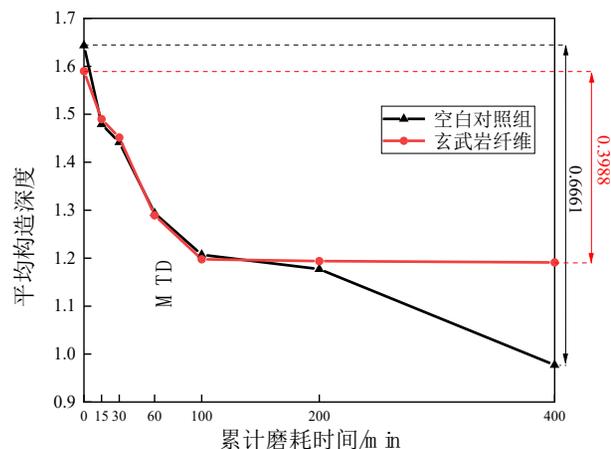
3. 纤维类外掺剂对混合料抗滑性能影响

纤维可在沥青混合料中形成三维网络结构,提升沥青混合料的综合路用性能。同时也可能改善混合料的级配嵌体结构,从而有助于提升其抗滑性能。本试验选择玄武岩纤维制备沥青混合料试件,纤维掺量为混合料质量的 3‰。使用温控磨光机进行模拟车轮磨耗试验,到达设定时间后即测试该阶段的摆值 BPN 和平均构造深度,摆值结果见如图 9 所示。



> 图 9 玄武岩纤维沥青混合料各磨耗阶段摆值 BPN

从图 9 可以看出,添加玄武岩纤维后,沥青混合料的抗滑初始值相差不大,约为 66BPN。然而,玄武岩纤维沥青混合料的抗滑峰值和抗滑终值较空白组分别提升了 2.8 和 3.1BPN。表明玄武岩纤维的加入,虽然对混合料的初始抗滑性能影响不大,但能有效改善其抗滑耐久性。观察沥青混合料磨光后的路面纹理,玄武岩纤维沥青混合料在不同磨耗阶段对应的平均构造深度 MTD 变化如图 10 所示。



> 图 10 玄武岩纤维沥青混合料各磨耗阶段平均构造深度 MTD

由图 10 可以看出,与空白组对比,加入玄武岩纤维后,沥青混合料的平均构造 MTD 值衰减幅度由 0.6661 减少至 0.3988。此外,经过 200min 磨耗之后,空白组的平均构造 MTD 值还呈现出下降趋势,但玄武岩纤维组的 MTD 已经趋于平缓。这表明玄武岩纤维的加入可显著提升混合料的抗滑耐久性能。这是因为玄武岩纤维能够增加沥青混合料的强度和韧性,对沥青混合料的增韧作用明显,使得混合料的嵌体结构更加稳固,从而延缓集料发生偏转现象。此外,玄武岩纤维也会参与到车轮磨光环节,从而进一步提升其抗滑耐久性。

(三) 实验教学效果

以沥青路面抗滑性能提升的工程问题为驱动,设置了沥青混合料抗滑性能影响因素实验,在老师的指导下,学生可自主设计方案并完成实验。通过不同组别实验结果对比,学生可从宏观摆值和微观构造层面,分析沥青混合料抗滑性能的变化规律和影响因素,有助于学生掌握科学的研究方法、提升其学习兴趣,培养其实践创新能力。此外,实验教学人员还能采用该实验装置,深入研究道路抗滑的相关问题,设计创新实验。

四、结语

自主研制了温控磨光机,通过长期加载、阶段测量的形式,开展了不同工况下沥青路面抗滑性能教学实验,研究了粗集料、高聚物外掺剂、玄武岩纤维等因素对路面抗滑性能的影响,结果表明,不同粗集料沥青混合料的磨光值衰减速率和衰减幅度存在差异,辉绿岩和钢渣混合料的抗滑耐久性优于玄武岩混合料;高聚物外掺剂对于沥青混合料的抗滑耐久性无显著影响;玄武岩纤维对于混合料的初始抗滑性能无影响,但可显著提升其抗滑耐久

性。通过对比不同组别的实验结果,学生可直观理解沥青混合料抗滑性能的变化规律,评估不同措施对于混合料抗滑耐久性的改善效果。此外,学生还可以结合沥青路面的实体工程,利用本磨

光机设置更多的实验工况,探索沥青路面抗滑机理等问题,满足实验教学探索性和高阶性的需求。

参考文献

- [1] Kumar A, Gupta A. Review of factors controlling skid resistance at tire-pavement interface [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021,2021:1-16.
- [2] Guo F, Pei J, Zhang J, et al. Study on the skid resistance of asphalt pavement: A state-of-the-art review and future prospective [J]. *Construction and Building Materials*, 2021,303:124411.
- [3] 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.
- [4] 徐晓明, 金林通, 郭嘉, 等. 沥青路面抗滑耐久性研究与发展 [J]. *公路*, 2024,3:6-13.
- [5] 周焯. 路基路面试验与检测 [M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- [6] 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(1):315-321.
- [7] Wang H, Liu Y, Yang J, et al. Evaluation of Anti-Skid Performance of Asphalt Mixture Based on Accelerated Loading Test [J]. *Applied Sciences*, 2023,13(8):4796.
- [8] Qian G, Wang Z, Yu H, et al. Research on surface texture and skid resistance of asphalt pavement considering abrasion effect [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024,20:e02949.
- [9] Wang D, He Y, Wang C, et al. Characterization of road surfacing aggregates based on their mineralogical fingerprint [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2022,9(5):880-891.
- [10] 高茜楠, 芮润华, 耿靖杰. 基于纹理分形特性的沥青路面抗滑性能研究综述 [J]. *交通信息与安全*, 2022,40(05):12-22.
- [11] 曹东伟, 郭清, 毛利建, 等. 基于集料掺掺设计的沥青超薄磨耗层抗滑特性 [J]. *公路交通科技*, 2024,40(1):108-117.
- [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] 余苗, 曾俊森, 罗延生, 等. 基于室内磨耗试验的沥青表面纹理演化规律分析 [J]. *重庆交通大学学报 (自然科学版)*, 2023,42(12):31-36.
- [14] 何玉林, 邢超, 洪斌, 等. 粗细集料磨光值对沥青路面长期抗滑的影响 [J]. *中国公路学报*, 2022,35(9):215-223.
- [15] 交通运输部公路科学研究院. 公路路基路面现场测试规程: JTG3450-2019 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.