

# 钢渣沥青混合料的抗滑性能试验与微观分析

杨克焕<sup>1,3</sup>, 刘新海<sup>1,2,3</sup>

(1. 广东华路交通科技有限公司, 广东 广州 510420; 2. 广东交科技术研发有限公司, 广东 广州 510420; 3. 广东省隧道工程安全与应急保障技术及装备企业重点实验室, 广东 广州 510420)

**摘要:** 现有钢渣沥青混合料抗滑性能研究主要集中于室内试验和宏观力学性能分析, 鲜有研究者开展试验路测试, 从微观角度探究抗滑性能提升机制。为解决这些问题, 设计了钢渣沥青混合料, 并设置了使用玄武岩集料的对照组沥青混合料。然后, 铺筑了试验路并开展了路面横向力系数、构造深度和摆值测试。随后, 对钢渣沥青混合料路面和玄武岩沥青混合料路面的抗滑性能试验数据进行了分析。接着, 对钢渣和玄武岩集料进行了扫描电镜试验, 从微观角度对钢渣提升沥青混合料抗滑性能的机制进行了解释。得出结论: 钢渣沥青混合料路面的抗滑性能优于玄武岩沥青混合料路面; 相较于玄武岩集料, 钢渣集料表面可吸收的沥青更多, 集料-沥青之间的黏附性能更强。

**关键词:** 钢渣; 沥青混合料; 试验路; 抗滑性能试验; 微观分析; 抗滑机制。

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)09-0380-05

## Anti-skid Performance Test and Microscopic Analysis of Steel Slag Asphalt Mixture

YANG Kehuan<sup>1,3</sup>, LIU Xinhai<sup>1,2,3</sup>

(1. Guangdong Hualu Transportation Technology Co., Ltd., Guangzhou 510420, China; 2. Guangdong Jiaoke Technology R&amp;D Co., Ltd., Guangzhou 510420, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Safety and Emergency Assurance Technology and Equipment for Tunnel Engineering, Guangzhou 510420, China)

**Abstract:** The current research on the anti-skid performance of steel slag asphalt mixture mainly focuses on laboratory test and macroscopic mechanical performance analysis. Few researchers have conducted the test road tests to explore the mechanism of anti-skid performance improvement from a microscopic perspective. To address these issues, the steel slag asphalt mixture is designed, and a control group asphalt mixture using basalt aggregate is set up. Then, a test road is paved, and the side-way force coefficient (SFC) test, the texture depth test, the pendulum value test are conducted on the road. Subsequently, the anti-skid performance test data of steel slag asphalt mixture pavement and basalt asphalt mixture pavement are analyzed. Finally, the scanning electron microscopy tests are conducted on steel slag and basalt aggregates to explain the mechanism by which steel slag enhances the skid resistance of asphalt mixtures from a microscopic perspective. The conclusion shows that the anti-skid performance of steel slag asphalt mixture pavement is better than that of basalt asphalt mixture pavement. Compared with basalt aggregates, the surface of steel slag aggregates can absorb more asphalt, and the adhesion between aggregates and asphalt is stronger.

**Keywords:** steel slag; asphalt mixture; test road; anti-slip performance test; microscopic analysis; anti-skid mechanism

## 0 引言

沥青路面抗滑性能对路面行车安全有着重要影响<sup>[1-4]</sup>。影响该性能的关键因素是路表沥青混合料的微观纹理和宏观纹理<sup>[5-6]</sup>。其中, 微观纹理主要由集料表面粗糙度决定<sup>[7]</sup>, 宏观纹理主要受混合料的

沥青含量、级配类型和空隙率控制。相较于通过改变混合料的宏观纹理, 通过更换集料改变沥青混合料微观纹理更为简便<sup>[8]</sup>。许多研究者设计了不同类型天然集料的对比试验<sup>[9-10]</sup>, 选出了玄武岩等利于沥青混合料抗滑耐磨性能的集料<sup>[11]</sup>。然而, 近年来, 环保政策日益严格, 矿料资源逐渐紧缺, 许多工程难以获取抗滑性能较优的天然集料。

为解决这一问题, 有研究者尝试使用“冶炼副产物集料”, 如钢渣集料代替传统天然集料, 以提升沥青混合料的抗滑性能<sup>[12-14]</sup>。为评估钢渣沥青混合料

收稿日期: 2025-02-17

基金项目: 广东省重点领域研发计划资助(2022B0101070001); 广东省交通集团科技项目(JT2023YB12)

作者简介: 杨克焕(1992—), 男, 本科, 工程师, 从事路基路面方面的研究工作。

的抗滑性能,研究者们开展了一系列研究,这些研究大多集中于室内试验<sup>[15-16]</sup>。有研究者通过室内加速磨损试验,探究了不同钢渣掺量对沥青混合料抗滑性能的影响,得出提高钢渣掺量有利于提升沥青混合料抗滑性能的结论<sup>[17]</sup>。也有研究者通过室内摆值试验和构造深度试验,将钢渣沥青混合料与普通沥青混合料的抗滑性能进行了对比,得出钢渣沥青混合料的摆值、构造深度均优于普通沥青混合料的结论<sup>[18]</sup>。

这些研究虽证明了钢渣对沥青混合料抗滑性能的提升有积极作用,但还存在两个问题:一是这些研究主要集中于室内试验,鲜有学者开展试验路测试,钢渣沥青混合料在实际工程中对抗滑性能的提升作用还有待验证;二是这些研究大多通过对比宏观力学性能试验得到结论,鲜有学者从微观角度对钢渣提升抗滑性能的机制进行分析。

为解决上述问题,本文拟依托高速公路项目,开展钢渣沥青混合料、对照组沥青混合料的设计、试验

路铺筑、抗滑性能测试及微观分析,以期 为钢渣沥青混合料的进一步应用提供抗滑性能数据和理论支撑。

1 原材料

本文以路面上面层 SMA-13 沥青混合料为研究对象,进行钢渣沥青混合料及玄武岩沥青混合料配合比设计,并进行试验段铺筑和抗滑性能测试。试验段沥青混合料原材料中,沥青采用南粤牌 I-D 等级的 SBS 改性沥青,主要技术性质见表 1。钢渣沥青混合料粗集料采用武汉馨安通建材有限公司提供的 5~10 mm、10~15 mm 钢渣,玄武岩沥青混合料粗集料采用新山丰石场的 5~10 mm、10~15 mm 玄武岩,细集料两者均采用江西玄武岩矿业有限公司提供的 3~5 mm 玄武岩和 0~3 mm 机制砂,集料的具体技术指标见表 2、表 3。矿粉采用江西永伦新材料科技有限公司生产的矿粉,矿粉具体技术指标见表 4。由表中试验结果可知,原材料各项技术指标满足规范中关于沥青、集料、矿粉的技术要求<sup>[19]</sup>。

表 1 沥青技术指标试验结果

| 检验指标 | 针入度/0.1 mm | 5℃延度/cm | 软化点/℃ | 25℃相对密度 | 旋转薄膜加热残留物 |        |
|------|------------|---------|-------|---------|-----------|--------|
|      |            |         |       |         | 质量变化/%    | 针入度比/% |
| 实测值  | 53         | 31      | 88    | 1.034   | 0.086     | 79     |
| 设计要求 | 40~60      | ≥20     | ≤75   | 实测值     | ±1.0      | ≤75    |

表 2 粗集料技术指标试验结果

| 技术指标    | 钢渣       |         | 玄武岩      |         | 技术要求 |      |
|---------|----------|---------|----------|---------|------|------|
|         | 10~15 mm | 5~10 mm | 10~15 mm | 5~10 mm | 钢渣   | 玄武岩  |
| 表观相对密度  | 3.497    | 3.479   | 2.876    | 2.864   | ≥2.9 | ≥2.6 |
| 毛体积相对密度 | 3.325    | 3.308   | 2.861    | 2.839   | —    | —    |
| 压碎值/%   | 13.1     | —       | 16.1     | —       | ≤26  | —    |
| 磨光值     | 52       | —       | 55.9     | —       | ≥42  | —    |
| 磨耗值/%   | —        | 14.2    | —        | 21.3    | ≤26  | ≤28  |
| 黏附性     | —        | 5 级     | —        | 5 级     | 4 级  | 5 级  |
| 吸水率/%   | 1.506    | 1.511   | 1.218    | 1.225   | ≤2.5 | —    |
| 浸水膨胀率/% | —        | 0.47    | —        | —       | ≤2   | —    |

表 3 细集料技术指标试验结果

| 检验指标                           | 3~5 mm 玄武岩 | 0~3 mm 机制砂 | 技术要求                     |
|--------------------------------|------------|------------|--------------------------|
| 表观相对密度                         | 2.868      | 2.789      | ≥2.60                    |
| 毛体积相对密度                        | 2.804      | 2.789      | —                        |
| 0.075 mm 以下颗粒含量/%              | 0.4        | 2.6        | ≤1.5(3~5 mm); ≤3(0~3 mm) |
| 砂当量/%                          | —          | 70         | ≥60                      |
| 亚甲蓝 MB 值/(g·kg <sup>-1</sup> ) | —          | 1.0        | ≤2.5                     |

表 4 矿粉技术指标试验结果

| 检验指标 | 表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 含水量/% | 外观    | 加热安定性 |
|------|----------------------------|-------|-------|-------|
| 实测值  | 2.717                      | 0.1   | 无团粒结块 | 无明显变化 |
| 技术要求 | ≥2.50                      | ≤1    | 无团粒结块 | 无明显变化 |

2 沥青混合料设计与试验路铺筑

2.1 配合比设计

钢渣 SMA-13 沥青混合料及玄武岩 SMA-13 沥青

表5 沥青混合料级配组成

| 级配范围       | 通过下列筛孔的质量百分率/% |         |        |         |         |         |        |        |         |          |
|------------|----------------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|---------|----------|
|            | 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 |
| 级配上限       | 100            | 100     | 75.0   | 34.0    | 26.0    | 24.0    | 20.0   | 16.0   | 15.0    | 12.0     |
| 级配下限       | 100            | 90.0    | 50.0   | 20.0    | 15.0    | 14.0    | 12.0   | 10.0   | 9.0     | 8.0      |
| 钢渣沥青混合料级配  | 100            | 96.2    | 61.2   | 26.0    | 20.1    | 16.2    | 13.4   | 11.9   | 11.0    | 9.6      |
| 玄武岩沥青混合料级配 | 100            | 96.3    | 61.9   | 26.5    | 20.8    | 16.9    | 13.8   | 12.5   | 11.7    | 10.5     |

表6 沥青混合料马歇尔试验结果

| 检验指标     | 钢渣 SMA-13 沥青混合料 | 玄武岩 SMA-13 沥青混合料 | 技术要求  |
|----------|-----------------|------------------|-------|
| 油石比/%    | 6.0             | 6.1              | —     |
| 毛体积相对密度  | 2.787           | 2.466            | —     |
| 最大理论相对密度 | 2.902           | 2.564            | —     |
| 空隙率/%    | 4.0             | 3.8              | 3~4.5 |
| 矿料间隙率/%  | 17.1            | 17.6             | ≥14   |
| 沥青饱和度/%  | 76.9            | 78.3             | 75~85 |
| 稳定度/kN   | 9.68            | 11.3             | ≥8    |
| 流值/0.1mm | 39.1            | 29.0             | 15~50 |

混合料的合成级配见表5。通过马歇尔试验方法确定钢渣沥青混合料最佳油石比为6.0%,玄武岩沥青混合料最佳油石比为6.1%。如表5所示,钢渣沥青混合料级配中的0.075 mm筛孔通过率,比玄武岩沥青混合料级配中的0.075 mm筛孔通过率低0.9%。因此,在钢渣吸油率更高的情况下,两种沥青混合料油石比相当。按照最佳合成级配和最佳油石比制备马歇尔试件,进行体积指标和马歇尔试验检测,试验结果见表6,均满足规范中的技术指标要求。

2.2 性能验证

按照两种SMA-13沥青混合料的配合比设计结果制备马歇尔试件及车辙试件,分别进行浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验及60℃车辙试验,验证其水稳定性和高温稳定性。试验结果见表7,均满足规范技术指标要求<sup>[20]</sup>。

表7 沥青混合料性能验证结果

| 检验指标                          | 钢渣 SMA-13 沥青混合料 | 玄武岩 SMA-13 沥青混合料 | 技术要求   |
|-------------------------------|-----------------|------------------|--------|
| 浸水马歇尔试验残留稳定度                  | 91.9            | 92.9             | ≥85    |
| 冻融劈裂试验残留强度比                   | 91.4            | 88.7             | ≥80    |
| 60℃动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> ) | 6 590           | 8 185            | ≥6 000 |

2.3 试验路铺筑

依托工程项目,选取试验路段进行沥青路面铺筑。钢渣SMA-13沥青混合料上面层试验路选在WSGS-SXLLX K23+200~K22+300、K22+000~K22+100、K21+050~K21+350右幅,试铺长度共计500 m,铺筑时间为2024年1月16日,设计厚度4.0 cm。玄

武岩SMA-13沥青混合料上面层试验路选在WSGS-SXLLX K23+200~K22+700右幅,试铺长度500 m,铺筑时间为2024年1月17日,设计厚度4.0 cm。对现场铺筑过程按照相关要求严格进行严格监控与检查,确保试验段铺筑质量。

3 抗滑性能测试与分析

路面完成铺筑后,对路面抗滑性能的主要技术指标进行测试,得到路面的横向力系数、构造深度和摆值数据。然后总结这些数据的规律,并对规律背后的原因进行分析。

3.1 抗滑性能测试

3.1.1 横向力系数测试

测试分别于2024年1月23日、2月24日及4月12日3个时间点进行,使用横向力系数检测车对试验路段路面行车道和超车道进行横向力系数检测,每隔10 m取一个检测点,检测结果平均值如图1(a)所示。

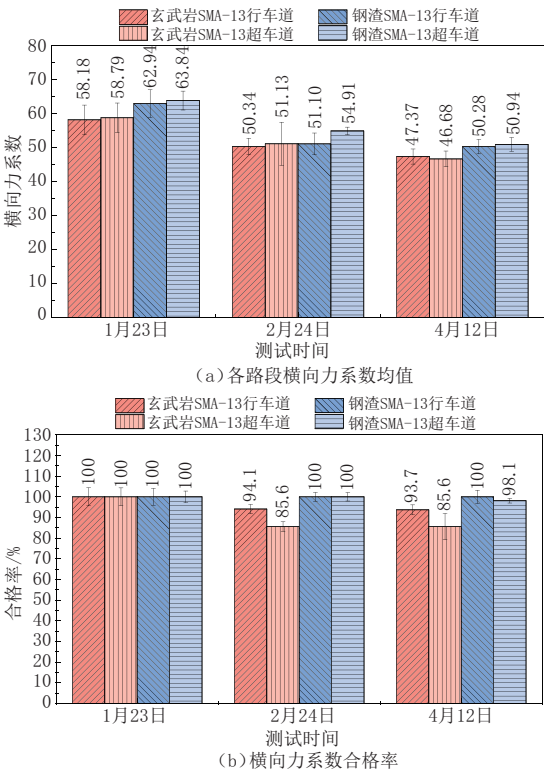


图1 路面横向力系数检测结果

由图 1(a)可知,钢渣 SMA-13 沥青混合料的横向力系数要优于玄武岩 SMA-13 沥青混合料,超车道横向力系数略优于行车道,说明钢渣对沥青混合料的抗滑性能的提升有积极作用。

根据检测标准,当横向力系数不小于 45 时,试验段路面抗滑性能为合格。由图 1(b)所示,铺筑完成后,随着时间的增加,试验段路面的横向力系数均成下降趋势,其抗滑性能合格率开始降低,玄武岩 SMA-13 沥青混合料路面部分路段先出现抗滑性能不满足要求的情况。

本次测试中,1 月 23 日至 2 月 24 日,路面横向力系数下滑明显,至 4 月 12 号横向力系数趋于稳定。其原因在于,路面铺筑完成后,集料表面包裹的沥青油膜在自然环境中的老化作用变硬,导致路面横向力系数下降。而后,随着车轮的磨耗,沥青油膜减薄,集料表面的微观构造起主导作用,横向力系数得以恢复提升,直至趋于稳定。

3.1.2 路面构造深度测试

在试验路段行车道轮迹带处选取测试点,用路面构造深度测定仪对路表构造深度进行测试,测试结果平均值如图 2 所示。

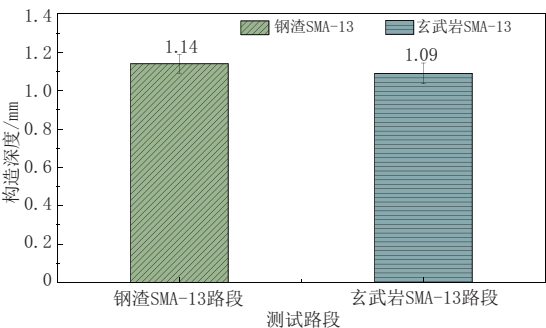


图 2 路面构造深度检测结果

由图 2 可知,钢渣 SMA-13 沥青混合料测试点构造深度平均值为 1.14,玄武岩 SMA-13 沥青混合料测试点构造深度平均值为 1.09。从路面构造深度角度分析,钢渣 SMA-13 沥青混合料路面的构造深度比玄武岩 SMA-13 沥青混合料路面高 4.59%,其抗滑性能更优。

3.1.3 摆值测试

在试验路段随机选取测试点,使用摆式摩擦系数测定仪测定沥青路面摆值,测试结果如图 3 所示。

由图 3 可知,钢渣 SMA-13 沥青混合料路面测试点摆值(british pendulum number, BPN)平均值为 75,玄武岩 SMA-13 沥青混合料路面测试点摆值平均值

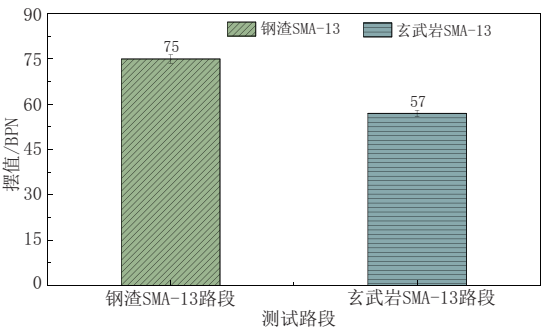


图 3 路面摆值检测结果

为 57。钢渣 SMA-13 沥青混合料路面测试点摆值平均值比玄武岩 SMA-13 沥青混合料路面测试点摆值平均值高 31.58%,钢渣 SMA-13 沥青混合料路面的抗滑性能更佳。

3.2 原理分析

由 3.1 节测试结果可知,钢渣 SMA-13 沥青混合料的路面抗滑性能优于玄武岩 SMA-13 沥青混合料。为探究这一现象背后的原因,本节进行了钢渣集料和玄武岩集料的扫描电镜(scanning electron microscopy, SEM)试验。试验时,将扫描电镜的加速电压设置为 10.00 kV,将钢渣集料、玄武岩集料对应的扫描电镜工作距离分别设置为 5.7 mm 和 5.3 mm。通过扫描电镜物镜内探测器得到的试验结果如图 4 所示。

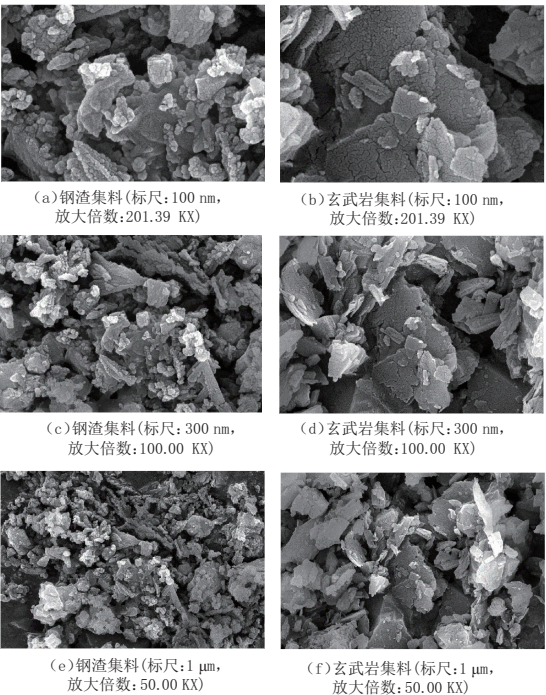


图 4 扫描电镜试验结果

由图 4 可知,钢渣集料和玄武岩集料的表面纹理明显不同。相较于玄武岩集料,钢渣集料的表面更粗糙,孔洞更多。表面纹理的差异使得钢渣 SMA-13

沥青混合料路面和玄武岩 SMA-13 沥青混合料路面的抗滑性能有所不同。钢渣集料拥有粗糙多孔结构,生产沥青混合料时,钢渣集料表面可吸收大量沥青,使得钢渣集料与沥青之间的黏附性能优于玄武岩集料与沥青之间的黏附性能,在宏观上表现为钢渣 SMA-13 沥青混合料路面的抗滑性能耐久性优于玄武岩 SMA-13 沥青混合料路面。此外,钢渣集料表面吸收的大量沥青,可使细集料更紧密地黏附在钢渣集料上,在宏观上表现为钢渣 SMA-13 沥青混合料路面的构造深度大于玄武岩 SMA-13 沥青混合料路面的构造深度,进而使得钢渣 SMA-13 沥青混合料路面的横向力系数和摆值大于玄武岩 SMA-13 沥青混合料路面的横向力系数和摆值。

## 4 结 论

本研究将钢渣作为粗集料,设计了一种抗滑型钢渣沥青混合料。然后,铺筑了试验路,对钢渣沥青混合料路面的抗滑性能进行了测试。随后,将钢渣沥青混合料路面的抗滑性能测试结果与玄武岩沥青混合料抗滑性能测试结果进行对比。最后,借助 SEM 试验结果,对两种沥青混合料路面抗滑性能之间的差异进行了分析,得到以下结论:

(1)相较于玄武岩 SMA-13 沥青混合料路面,钢渣 SMA-13 沥青混合料路面抗滑性能更优,其路面横向力系数、构造深度和摆值更大,且更耐磨。

(2)相较于玄武岩集料,钢渣集料表面更为粗糙,空隙更多,生产混合料时,钢渣集料表面吸收的沥青更多,集料-沥青之间的黏附性能更强。

(3)钢渣沥青混合料具备良好的抗滑耐磨性能,可应用于抗滑性能要求较高的路段。

### 参考文献:

- [1] 彭佳,纪东,汪星钧,等.弯道湿滑路面抗滑性能仿真与安全行车速度计算[J].科学技术与工程,2024,24(24):10491-10499.
- [2] He Y, Yang X, Xiao S, *et al.* Experimental study on the high-speed frictional behavior between the tire and asphalt pavement[J]. Construction and Building Materials, 2023(371): 130782.
- [3] 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): 124411-124416.
- [4] 王维锋.路面抗滑性能影响弯道行车安全的仿真分析[J].交通信息与安全,2017,35(6):32-37.
- [5] 汪海年,李英凯,王惠敏,等.粗集料形态对沥青路面抗滑性能影响研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2025,44(1):25-32.
- [6] 魏彩旺,苏毅,孙熔正,等.基于加速加载试验的沥青混合料抗滑特性研究[J].城市道桥与防洪,2024(3):204-208;219.
- [7] He Y, Fan Z, Yang X, *et al.* Study on the influence of tire polishing on surface texture durability and skid resistance deterioration of asphalt pavement[J]. Wear, 2024(556): 205518.
- [8] Wang D, Zhang Z, Kollmann J, *et al.* Development of aggregate micro-texture during polishing and correlation with skid resistance[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2020, 21(5): 629-641.
- [9] Lei J, Zheng N, Fujing Z, *et al.* Influence of Aggregate Types on the Long-Term Skid Resistance of Porous Asphalt Mixture Based on the Laboratory MMLS[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2024, 36(10): 04024301.
- [10] Gao J, Wang H, Bu Y, *et al.* Influence of coarse-aggregate angularity on asphalt mixture macroporosity: skid resistance, high-temperature, and compaction performance [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(5): 04020095.
- [11] 熊锐,杨发,关博文,等.路用高抗滑集料耐磨性能评价与机理分析[J].材料导报,2019,33(20):3436-3440.
- [12] 宋建军,吴少鹏,卓武极,等.钢渣再生沥青混合料路用性能及抗滑性能研究[J].交通科技,2024(3):126-130.
- [13] Gan Y, Li C, Ke W, *et al.* Study on pavement performance of steel slag asphalt mixture based on surface treatment[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022(16): 01131.
- [14] Wen H, Wu S, Bhusal S. Performance evaluation of asphalt mixes containing steel slag aggregate as a measure to resist studded tire wear [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(5): 04015191.
- [15] Cui P, Wu S, Xiao Y, *et al.* Enhancement mechanism of skid resistance in preventive maintenance of asphalt pavement by steel slag based on micro-surfacing[J]. Construction and Building Materials, 2020,(239): 117870.
- [16] Yang C, Wu S, Cui P, *et al.* Performance characterization and enhancement mechanism of recycled asphalt mixtures involving high RAP content and steel slag[J]. Journal of Cleaner Production, 2022(336): 130484.
- [17] 武建民,覃仲,徐长春,等.基于加速磨耗试验的钢渣-橡胶沥青混合料抗滑性能[J].科学技术与工程,2022,22(9):3735-3743.
- [18] 林志平,肖光书,杨斌,等.AC-20全钢渣集料沥青混凝土路用性能试验研究[J].南昌大学学报(工科版),2021,43(4):354-359.
- [19] JTG 3432—2024,公路工程集料试验规程[S].
- [20] JTG F40—2004,公路沥青路面施工技术规范[S].