

# 铁尾矿沥青混合料的路用性能

刘圣洁<sup>1</sup>,唐亮<sup>2</sup>,赵硕<sup>3</sup>,杜宪华<sup>4</sup>,王俊杰<sup>5</sup>,赵之仲<sup>1\*</sup>,薛军<sup>2</sup>

1. 山东交通学院交通土建工程学院,山东 济南 250357;2. 山东省路桥集团有限公司,山东 济南 250014;  
3. 河南省交通规划设计研究院股份有限公司,河南 郑州 450001;  
4. 肥城市交通运输局,山东 泰安 271600;5. 山东省交通工程监理咨询有限公司,山东 济南 250010

**摘要:**为减少大量堆放的固废材料铁尾矿对生态环境的影响,以铁尾矿自身集料特性为基础,探索将铁尾矿用作沥青路面骨料的可行性。以玄武岩矿料为对照组,检测铁尾矿物理指标,更换不同粒径的铁尾矿制备试件,进行车辙试验、低温弯曲试验、浸水马歇尔试验及三轮加速磨耗试验评估其路用性能。结果表明:铁尾矿沥青混合料的性能符合沥青路面层的基本要求;与玄武岩沥青混合料相比,掺加粒径为4.75~13.20 mm的铁尾矿沥青混合料路用性能改善最明显,高温动稳定度升高16.55%,低温最大拉应变为玄武岩的1.13倍,浸水残留稳定度降低6.58%,冻融劈裂试验的残留强度比降低8.03%,且抗滑性能始终优于玄武岩,各项路用性能均能满足规范要求。

**关键词:**路面材料;铁尾矿;沥青混合料;路用性能;配合比

**中图分类号:**U416.217

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-0032(2023)03-0081-06

**引用格式:**刘圣洁,唐亮,赵硕,等.铁尾矿沥青混合料的路用性能[J].山东交通学院学报,2023,31(3):81-86.

LIU Shengjie, TANG Liang, ZHAO Shuo, et al. Road performance of iron tailings asphalt mixture[J].  
Journal of Shandong Jiaotong University, 2023, 31(3): 81-86.

## 0 引言

尾矿是工业固体废弃物的主要组成部分之一。冶炼铁矿石会产生较多品位不符合冶炼标准的铁尾矿。目前我国堆放的尾矿近50亿t,年排出尾矿近5亿t,尾矿总量的1/3为铁尾矿<sup>[1-2]</sup>。大量堆放的铁尾矿不仅占用土地资源,还破坏生态平衡<sup>[3-4]</sup>。但我国的铁尾矿回收技术有限,综合利用率仅为7%<sup>[5]</sup>,如何综合利用铁尾矿成为亟待解决的难题。

随固废利用研究的推进,多金属组分、硬度高、表面粗糙多棱角的铁尾矿在各领域应用广泛<sup>[6]</sup>:通过二次资源再选,铁尾矿可进行有价元素及矿物回收<sup>[7-8]</sup>;在资源再选后采用改性技术可制备建筑原材料,如水泥、混凝土骨料、胶凝材料、砖瓦和玻璃建材等<sup>[9]</sup>,达到综合利用尾矿的目的<sup>[10]</sup>;曹丽萍等<sup>[11]</sup>、刘晶磊等<sup>[12]</sup>分析铁尾矿的性能规律,探讨其作为公路填筑材料的可行性;张宝虎等<sup>[13]</sup>采用体积法设计铁尾矿砂石沥青混凝土,抗车辙能力较强;田知文<sup>[14]</sup>通过掺加改性剂改善铁尾矿沥青混合料的高温稳定性及低温抗裂性。但铁尾矿的改性条件相对复杂,综合利用率较低<sup>[15-18]</sup>。

本文制备以铁尾矿为主的新型路面沥青混合料,成本低廉,工艺简单,以期减轻过渡开采石料、天然

**收稿日期:**2022-09-20

**基金项目:**山东省自然科学基金资助项目(ZR2020QE274);山东省重点研发计划(软科学)项目(2020RKB01602);山东省交通运输厅科技计划项目(2020B93,2022B102);山东交通学院2022年研究生科技创新项目(2022YK024)

**第一作者简介:**刘圣洁(1997—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向为交通基础设施建设,E-mail:liushengjie97@126.com。

**\*通信作者简介:**赵之仲(1978—),男,山东德州人,副教授,工学博士,主要研究方向为路基路面工程、BIM技术等,E-mail:zhaozhizhong@sdjtu.edu.cn。

骨料不足的现实压力,分析某铁尾矿的物理性能和其作为沥青路面骨料的可行性;以玄武岩集料为对照组,掺加不同粒径铁尾矿制备试件,并进行路面性能试验评估铁尾矿沥青混合料的路用性能,为铁尾矿的大规模应用提供理论支撑。

1 原材料性能

选用辽宁本溪鞍山式铁尾矿。岩石组合类型为硅铁建造、角闪岩、硅质岩。矿体整体大而贫,矿石矿物组分较简单,铁尾矿中铁元素的平均质量分数为 27%~34%。

1.1 集料与沥青

选用玄武岩集料作为对照组,选用苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(styrene butadiene styrene, SBS)类 I-C 级改性沥青,技术指标均满足文献[19]的要求。

1.2 铁尾矿

根据文献[19],用粗集料的要求检测铁尾矿的物理指标,结果如表 1 所示。

表 1 铁尾矿物理指标的检测结果

| 材料                   | 集料压碎值/% | 表观相对密度 | 毛体积相对密度 | 吸水率/% | <0.075 mm 颗粒质量分数/% |
|----------------------|---------|--------|---------|-------|--------------------|
| 0~5 mm 铁尾矿           |         | 2.806  | 2.784   | 1.06  | 0.05               |
| >5~10 mm 铁尾矿         |         | 2.813  | 2.726   | 1.32  | 0.08               |
| >10~15 mm 铁尾矿        | 18.2    | 2.886  | 2.834   | 0.49  | 0.01               |
| 玄武岩                  | 20.3    | 2.621  | 2.596   | 1.10  | 0.56               |
| 标准要求 <sup>[19]</sup> | ≤26     | ≥2.6   | 实测记录    | ≤2.0  | ≤1.0               |

由表 1 可知:铁尾矿粗集料的物理指标符合高速公路及一级公路沥青混合料用粗集料要求;相较于玄武岩集料,铁尾矿的压碎值较好,抗压能力较强;表观相对密度和毛体积相对密度较大,孔隙率较小,耐久性能较好,各项指标均达到路用性能的要求,可作为沥青高等级路面集料使用。

2 沥青混合料配合比设计

2.1 级配设计

选用 SBS 类 I-C 级改性沥青,采用马歇尔法设计玄武岩沥青混合料的配合比,选择接近 SMA-13(沥青玛蹄脂碎石混合料,stone mastic asphalt,SMA)级配范围中值的矿料级配,根据文献[20]中的成型马歇尔试件,目标矿料级配曲线如图 1 所示。粒径分别为>10~15 mm、>5~10 mm、0~5 mm 的铁尾矿、矿粉的质量比为 47.5:34.0:10.5:8.0 时为最佳配合比。

2.2 最佳沥青质量比

根据文献[20],对玄武岩沥青混合料选用油石比 6.0%为基值,等差初选 4 组油石比分别为 5.8%、6.0%、6.2%、6.4%成型马歇尔试件,马歇尔试验指标如表 2 所示。确定沥青与玄武岩混合料的最佳质量比为 6.038%,计算结果比经验结果偏大,原因是玄武岩粒料存在微孔,试验时沥青填充微孔。为计算方便,取沥青与玄武岩混合料的最佳质量比为 6.0%。

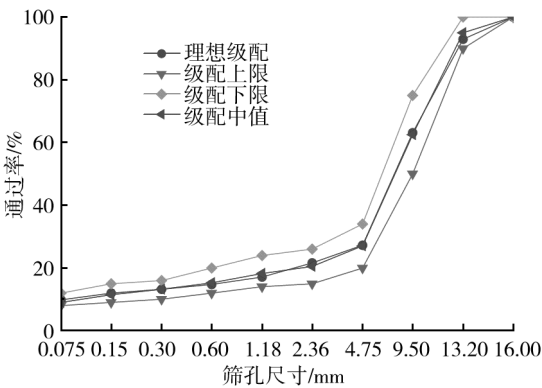


图 1 初拟 SMA-13 级配曲线

表 2 SMA-13 不同油石比下的马歇尔试验指标

| 油石比/%                | 空隙率/% | 间隙率/% | 饱和度/% | 稳定度/kN | 毛体积相对密度 | 理论最大相对密度 |
|----------------------|-------|-------|-------|--------|---------|----------|
| 5.8                  | 4.0   | 18.3  | 78.7  | 10.87  | 2.637   | 2.757    |
| 6.0                  | 3.4   | 17.6  | 80.1  | 11.40  | 2.655   | 2.740    |
| 6.2                  | 3.2   | 17.4  | 83.6  | 13.28  | 2.674   | 2.728    |
| 6.4                  | 2.8   | 16.7  | 86.3  | 11.51  | 2.668   | 2.714    |
| 标准要求 <sup>[20]</sup> | 3~4.5 | ≥16.5 | 70~85 | ≥6.0   |         |          |

3 路用性能

为确保铁尾矿沥青路面的路用性能符合文献[20]要求,将玄武岩分别更换为 4.75~9.50 mm、4.75~13.20 mm、>9.50~13.20 mm 等 3 种不同粒径的铁尾矿制备试件,样品代码分别为 SMA-13a、SMA-13b、SMA-13c,对比分析其与玄武岩沥青混合料的稳定性和抗滑性。

3.1 高温稳定性

采用动稳定度评价沥青混合料的高温稳定性,试验温度为 60 ℃,接触压力为 0.7 MPa;记录试验结果并计算动稳定度,SMA-13a、SMA-13b、SMA-13c、SMA-13(对照组)的高温动稳定度分别为 6 324、6 851、6 533、5 878 次/mm。

铁尾矿沥青混合料的高温动稳定度比对照组均有所提升,SMA-13b 的高温稳定度最好,比 SMA-13 高 16.55%,SMA-13a 和 SMA-13c 的动稳定度比 SMA-13 分别高 7.59%、11.14%。原因是铁尾矿棱角性和粗糙度比玄武岩好,集料间相互接触交叉后摩擦力相对较大,高温动稳定性有所增强。铁尾矿沥青混合料能较好地满足路用性能要求,可应用在路面实际施工中,实际施工中应选级配范围广且级配等级优良的铁尾矿粒料。

3.2 低温稳定性

以低温弯曲试验中的最大弯拉应变表征材料的低温性能,控制试验温度为-10 ℃,设置马歇尔稳定度测定仪加载速度为 50 mm/min,采样间隔为 3 s,4 种沥青混合料的低温弯曲试验结果如表 3 所示。

表 3 4 种沥青混合料低温弯曲试验结果

| 试件      | 最大荷载/N | 跨中挠度/mm | 抗弯拉强度/MPa | 最大拉应变 | 弯曲劲度模量/MPa |
|---------|--------|---------|-----------|-------|------------|
| SMA-13a | 1 202  | 0.482 9 | 9.81      | 2.535 | 3 870.71   |
| SMA-13b | 1 312  | 0.544 2 | 10.71     | 2.857 | 3 748.76   |
| SMA-13c | 1 246  | 0.504 6 | 10.17     | 2.649 | 3 839.72   |
| SMA-13  | 1 187  | 0.459 2 | 9.69      | 2.411 | 4 018.99   |

注:弯曲劲度模量为弯曲应力与弯曲形变之比。

由表 3 可知:相比玄武岩沥青混合料,铁尾矿沥青混合料的低温稳定性较好,符合路用性能要求。铁尾矿沥青混合料的临界应变是玄武岩的 1.05~1.18 倍。随铁尾矿质量比的增大,小梁最大拉应变增大,采用 SMA-13b 的小梁的临界应变是采用 SMA-13a 的小梁的 1.13 倍,原因是铁尾矿比玄武岩黏结沥青轻质组分更少,可提高沥青混合料的柔韧性。

3.3 水稳定性

通过浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验检验铁尾矿沥青混合料的水稳定性,评价试件残留稳定度及冻融劈裂强度比  $E_{TSR}$ ,4 种试件的水稳定性试验结果如表 4 所示。

表 4 4 种沥青混合料的水稳定性试验结果

| 试件      | 稳定度/kN | 浸水 48 h 后<br>稳定度/kN | 试件浸水残留<br>稳定度/% | 未冻融循环第 1 组<br>有效试件平均劈裂<br>抗拉强度/MPa | 冻融循环后第 2 组<br>有效试件平均劈<br>裂抗拉强度/MPa | $E_{TSR}/\%$ |
|---------|--------|---------------------|-----------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------|
| SMA-13a | 9.63   | 8.94                | 92.83           | 0.822                              | 0.695                              | 84.55        |
| SMA-13b | 9.34   | 8.27                | 88.54           | 0.801                              | 0.646                              | 80.65        |
| SMA-13c | 9.58   | 8.81                | 91.96           | 0.814                              | 0.677                              | 83.17        |
| SMA-13  | 9.77   | 9.26                | 94.78           | 0.837                              | 0.734                              | 87.69        |

由表 4 可知:铁尾矿对沥青混合料的水稳定性有一定影响,SMA-13b 的浸水残留稳定度比 SMA-13 减小 6.58%, $E_{TSR}$  减小 8.03%。铁尾矿中石英和云母的质量分数比玄武岩大,结晶程度较好,铁尾矿沥青混合料的水稳定性降低,但仍满足马歇尔试验残留稳定度大于 80%的要求,且满足潮湿区残留稳定度不低于 85%的要求<sup>[19]</sup>,可应用在实际道路施工中。

3.4 抗滑性

通过三轮加速加载试验研究铁尾矿沥青混合料的摩擦因数,检验其抗滑性能。荷载为 0.7 MPa,转速为 60 r/min,对铁尾矿沥青混凝土面板进行磨耗测试;经过约 20 万次的磨耗后,沥青路面摩擦因数趋于稳定,以该稳定值为基础,对比分析其他沥青混凝土面板的抗滑性能。采用动态摩擦因数测试仪测定磨耗 0、1 万、2 万、5 万、10 万、20 万次后 SMA-13b 铁尾矿沥青混合料的动态摩擦因数,结果如图 2 所示。

由图 2 可知:随三轮磨耗次数的增大,2 种沥青混凝土面板的动摩擦因数先增大后减小。在磨耗初期,随三轮磨耗次数的增大,2 种沥青混凝土面板的动摩擦因数增大,在三轮磨耗次数约为 2 万次时达到最大动态摩擦因数,铁尾矿沥青混凝土面板的最大动摩擦因数为 0.47,玄武岩沥青混合料为 0.44;随后 2 种沥青混凝土面板的动摩擦因数开始减小,在三轮磨耗次数约为 15 万次时趋于稳定,且两者的动摩擦因数之差约为 0.02,但铁尾矿沥青混合料的抗滑性能始终优于玄武岩沥青混合料,符合文献[19]要求。因此,铁尾矿可代替玄武岩作为沥青骨料,适用于高等级公路面层。

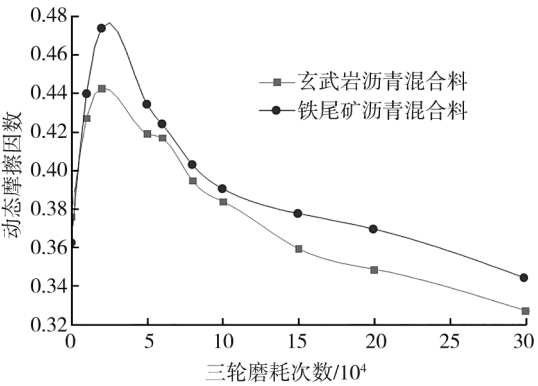


图 2 铁尾矿沥青混合料动态摩擦因数

4 结论

1) 在沥青混合料中掺加粒径分别为 4.75~9.50、4.75~13.20、>9.50~13.20 mm 的铁尾矿制备试件,进行车辙试验、低温弯曲试验、浸水马歇尔试验及三轮加速磨耗试验,评估铁尾矿沥青混合料的路用性能。掺加粒径为 4.75~13.20 mm 铁尾矿的沥青混合料的高温稳定性最好,动稳定度为 6 851 次/mm,比玄武岩沥青混合料提高了 16.55%。铁尾矿沥青混合料的临界应变是玄武岩沥青混合料的 1.05~1.18 倍,铁尾矿与混合料的质量比与小梁最大拉应变成正比,铁尾矿沥青混合料的高温稳定性和低温稳定性均满足路用性能要求。

2) 掺加粒径为 4.75~13.20 mm 铁尾矿的沥青混合料的浸水残留稳定度降至 88.54%,比玄武岩沥青混合料减小 6.58%,但水稳定性仍满足路用性能要求。铁尾矿沥青混合料的抗滑性能始终优于玄武岩沥青混合料。

本研究尚处于试验室阶段,实际施工中综合影响因素较多,需铺筑一定长度的试验路段,在不同环境

下验证铁尾矿沥青混合料的路用性能。

### 参考文献:

- [1] 张建林,韩显松.铁尾矿混凝土应用特性试验研究[J].西安科技大学学报,2015,35(3):381-385.  
ZHANG Jianlin, HAN Xiansong. Experimental study on the iron tailings concrete[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2015,35(3):381-385.
- [2] 潘德安,逯海洋,刘晓敏,等.铁尾矿建材化利用的研究进展与展望[J].硅酸盐通报,2019,38(10):3162-3169.  
PAN Dean, LU Haiyang, LIU Xiaomin, et al. Research progress and prospect on utilization of iron tailings for building materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019,38(10):3162-3169.
- [3] 杨亚东,刘新亮,张冰,等.铁尾矿资源综合利用现状研究[J].化工矿物与加工,2021,50(1):28-32.  
YANG Yadong, LIU Xinliang, ZHANG Bing, et al. Research on status of comprehensive utilization of iron tailings[J]. Industrial Minerals & Processing, 2021,50(1):28-32.
- [4] 刘文博,姚华彦,王静峰,等.铁尾矿资源化综合利用现状[J].材料导报,2020,34(增刊1):268-270.  
LIU Wenbo, YAO Huayan, WANG Jingfeng, et al. Current situation of comprehensive utilization of iron tailings[J]. Materials Reports, 2020,34(Suppl.1):268-270.
- [5] 吕绍伟,姜屏,钱彪,等.铁尾矿砂力学特性及再生利用研究进展[J].硅酸盐通报,2020,39(2):466-470.  
LÜ Shaowei, JIANG Ping, QIAN Biao, et al. Research progress on mechanical properties and recycling of iron tailings sand[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020,39(2):466-470.
- [6] 路畅,陈洪运,傅梁杰,等.铁尾矿制备新型建筑材料的国内外进展[J].材料导报,2021,35(5):5011-5026.  
LU Chang, CHEN Hongyun, FU Liangjie, et al. Research progress on the preparation of new building materials using iron tailings[J]. Materials Reports, 2021,35(5):5011-5026.
- [7] 邓小龙,李茂林,刘旭,等.磁选-絮凝-反浮选从山东某铁尾矿中回收铁试验[J].金属矿山,2018(6):172-178.  
DENG Xiaolong, LI Maolin, LIU Xu, et al. Magnetic separation-flocculation-reverse flotation recovery iron from an iron tailings in Shandong province[J]. Metal Mine, 2018(6):172-178.
- [8] LI C, SUN H, YI Z, et al. Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings: Part 2: the residues after iron recovery from iron ore tailings to prepare cementitious material[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010,174(1/2/3):78-83.
- [9] 马明鑫.铁尾矿泡沫玻璃制备及添加量研究[D].西安:陕西科技大学,2017.  
MA Mingxin. Investigation on the preparation and tailing addition of foam glass[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2017.
- [10] 王荣林,王欢.细粒尾矿综合利用技术研究[J].现代矿业,2020,36(3):108-112.  
WANG Ronglin, WANG Huan. Study on comprehensive utilization technology of fine tailings[J]. Modern Mining, 2020,36(3):108-112.
- [11] 曹丽萍,张晓亢,杨晨,等.基于分子动力学的硅烷偶联剂对铁尾矿沥青混合料改性的机理[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2276-2286.  
CAO Liping, ZHANG Xiaokang, YANG Chen, et al. Modification mechanism of iron tailings asphalt mixture by silane coupling agents based on molecular dynamics[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2021,52(7):2276-2286.
- [12] 刘晶磊,仇健,薛晓峰,等.干湿循环作用下改良铁尾矿强度特性试验研究[J].公路,2019,64(7):25-31.  
LIU Jinglei, ZHANG Jian, XUE Xiaofeng, et al. Experimental research on strength characteristics of stabilized iron tailings under drying-wetting cycles[J]. Highway, 2019,64(7):25-31.
- [13] 张宝虎,余天航,韩先瑞,等.铁尾矿砂石骨料沥青混凝土性能研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2019,43(3):481-485.  
ZHANG Baohu, YU Tianhang, HAN Xianrui, et al. Research on performance of asphalt concrete by iron tailings aggregate[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering), 2019,43(3):481-485.
- [14] 田知文.铁尾矿沥青混合料性能评价及改善措施研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.  
TIAN Zhiwen. Performance evaluation and improvement measurements of iron tailings asphalt mixture[D]. Harbin: Harbin

- Institute of Technology, 2018.
- [15] 牛玺荣, 孙延芳. 铁尾矿砂路基沉降及稳定性数值分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(1): 9-16.  
NIU Xirong, SUN Yanfang. Numerical analysis on settlement and stability of iron ore tailings subgrade[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2018, 38(1): 9-16.
- [16] 陈琦. 碱渣-磷矿尾砂-黏土混合料的路用性能与工程应用[D]. 南京: 东南大学, 2020.  
CHEN Qi. Road performance and engineering application of soda residue-phosphate tailings-clay admixtures[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [17] 杨青. 无机结合料稳定铁尾矿砂的路用性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.  
YANG Qing. Research on pavement performance of iron tailings sand stabilized with inorganic binder[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [18] 赵辉, 储诚富, 郭坤龙, 等. 铁尾矿砂改良膨胀土基本工程性质试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(6): 98-104.  
ZHAO Hui, CHU Chengfu, GUO Kunlong, et al. Experimental analysis of the basic engineering properties of expansive soils improved by iron tailings sand[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2017, 39(6): 98-104.
- [19] 中华人民共和国交通运输部, 交通运输部公路科学研究院. 公路工程集料试验规程: JTG E42—2005[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [20] 中华人民共和国交通运输部, 交通运输部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.

## Road performance of iron tailings asphalt mixture

LIU Shengjie<sup>1</sup>, TANG Liang<sup>2</sup>, ZHAO Shuo<sup>3</sup>, DU Xianhua<sup>4</sup>,  
WANG Junjie<sup>5</sup>, ZHAO Zhizhong<sup>1\*</sup>, XUE Jun<sup>2</sup>

1. School of Transportation and Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Shandong Luqiao Group Co., Ltd., Jinan 250014, China;

3. Henan Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China;

4. Feicheng Transpot Bureau, Taian 271600, China; 5. Shandong Traffic Engineering Supervision Consulting Co., Ltd., Jinan 250010, China

**Abstract:** To reduce the impact of a large amount of solid waste material iron tailings on the ecological environment, based on the aggregate characteristics of iron tailings, the feasibility of using iron tailings as asphalt pavement aggregates on a large scale is explored. Using basalt ore as the control group, the physical indicators of iron tailings are tested, and specimens are prepared by replacing iron tailings with different particle sizes. The road performance is evaluated through rutting tests, low-temperature bending tests, immersion Marshall tests, and three wheel accelerated wear tests. The results show that: The performance of iron tailings asphalt mixture meets the basic requirements of asphalt pavement layer; Compared with basalt asphalt mixture, adding iron tailings asphalt mixture with particle size from 4.75 to 13.20 mm has the most significant improvement in road performance, with a 16.55% increase in high-temperature dynamic stability, 1.18 times that of basalt in the maximum tensile strain at low temperature, a 6.58% decrease in the residual stability after immersion, and a 8.00% decrease in the residual strength ratio during freeze-thaw splitting test. The skid resistance has always been superior to basalt, and all road performance can meet the specification requirement

**Keywords:** pavement material; iron tailings; asphalt mixture; road performance; mix ratio

(责任编辑: 王惠)