

煤矸石粉填料橡胶沥青混合料路用性能研究

Study on Road Performance of Coal Gangue Powder Filler Rubber Asphalt Mixture

刘辰昊^{1,2}, 张 策³, 刘伟超^{1,2}, 王立朋⁴, 李国林⁵, 刘佳辉⁶, 杨 佳⁷

- (1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043; 2. 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室 (石家庄铁道大学), 石家庄 050043; 3. 天津新亚太工程建设监理有限公司, 天津 300143; 4. 中铁十九局集团第五工程有限公司, 大连 116103; 5. 中铁十九局集团有限公司, 北京 100176; 6. 河北省交通规划设计研究院有限公司, 石家庄 050021; 7. 中国土工合成材料工程协会, 石家庄 050043)

摘要: 为探究煤矸石粉填料改性对橡胶沥青混合料路用性能的影响, 采用煤矸石粉和石灰石粉两种填料进行橡胶沥青混合料 ARHM-13 (W) 的路用性能分析。采用扫描电镜试验和 XRF 试验对比分析了填料的微观特性, 通过马歇尔试验对比最佳油石比下各填料混合料的物理力学指标, 通过高温车辙试验、低温小梁弯曲试验、冻融劈裂试验, 对比分析各性能指标。结果表明: 煤矸石粉较石灰石粉的表面构造更加复杂, 含有鳞片状结构, 比表面积更大, 含有更多的 SiO_2 和 Al_2O_3 等活性氧化物, 可作为良好的填料; 煤矸石粉填料橡胶沥青混合料最佳油石比更大、动稳定度更高、永久变形更低, 劈裂强度比提高, 高温性能和水稳定性得到提高; 石灰石粉填料橡胶沥青混合料的弯曲劲度模量更低、极限弯拉应变更大, 低温性能相对较好; 在对橡胶沥青混合料动稳定度、变形、强度、高温性能和水稳定性要求较高时可采用煤矸石粉作为填料, 在提升沥青混合料路用性能的同时可提高煤矸石的利用率。

关键词: 煤矸石粉; 橡胶沥青混合料; 路用性能

中图分类号: U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 01-0034-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.01.007

LIU Chenhao^{1,2}, ZHANG Ce³, LIU Weichao^{1,2}, WANG Lipeng⁴, LI Guolin⁵, LIU Jiahui⁶, YANG Jia⁷

- (1. College of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Road and Railway Engineering Safety Assurance, Shijiazhuang Tiedao University, shijiazhuang 050043, China; 3. Tianjin New Asia Pacific Engineering Construction Supervision Co., Ltd., Tianjin 300143, China; 4. China Railway 19th Bureau Group Fifth Engineering Co., Ltd., Dalian 116103, China; 5. China Railway 19th Bureau Group Co., Ltd., Beijing 100176, China; 6. HeBei Provincial Communications Planning Design and Research Institute Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China; 7. China Technical Association on Geosynthetics, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to investigate the influence of coal gangue powder filler modification on the road performance of rubber asphalt mixture, coal gangue powder and limestone powder were used to analyze the road performance of rubber asphalt mixture ARHM-13 (W). The microscopic properties of the fillers were compared by SEM and XRF tests, the physical and

作者简介: 刘辰昊 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 道路工程材料。

通信作者: 刘伟超 (1984—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向: 土工合成材料应用。

收稿日期: 2024-10-31

mechanical indexes of the fillers were compared by Marshall test under the optimal oil stone ratio, and the performance indexes were compared by high temperature rutting test, low temperature trabecular bending test and freeze - thaw splitting test. The results show that the surface structure of coal gangue powder is more complex than that of limestone powder, containing flake structure, larger specific surface area, containing more active oxides such as SiO_2 and Al_2O_3 , which can be used as a good filler. The optimum ratio of oil stone, dynamic stability, permanent deformation, splitting strength ratio, high temperature performance and water stability of coal gangue powder filling rubber asphalt mixture are improved. The bending stiffness modulus of limestone powder filler rubber asphalt mixture is lower, the limit bending tension should be changed greatly, and the low temperature performance is relatively good. When the dynamic stability, deformation, strength, high temperature performance and water stability of rubber asphalt mixture are required, coal gangue powder can be used as filler, which can improve the road performance of asphalt mixture and improve the utilization rate of coal gangue.

Key words: coal gangue powder; rubber asphalt mixture; road performan

0 引言

现代公路建设向着绿色环保和可持续方面发展, 沥青道路和养护工程领域更愿意使用可重复利用的废弃物材料, 实现固废利用^[1]。煤矸石粉的物化性质优异, 可以用于建筑材料, 改良土壤等^[2-3]。若能将煤矸石粉代替石灰石粉作为填料制作橡胶沥青混合料, 不但解决了煤矸石粉的二次利用问题, 还可以提高路面的性能。

关于煤矸石粉的资源化利用已有大量的研究。马宾辉等^[4]向膨胀土中掺入 6%、8%、10%、12% 的煤矸石粉, 研究不同煤矸石粉掺量下膨胀土的黏聚力, 内摩擦角和无荷载膨胀率的变化规律, 通过与素膨胀土对比, 发现煤矸石粉能够有效地降低膨胀土的胀缩性, 提高黏聚力并且改良膨胀土的抗剪强度, 综合考虑确定煤矸石粉的最佳掺量为 8%; 金阳等^[5]探究了不同掺量煤矸石粉对混凝土强度和渗透性能的影响, 发现煤矸石粉能显著提高混凝土的抗氯离子渗透性, 并且掺量在 20% 时改善效果达到最佳。蒸汽养护通过对自燃煤矸石粉的火山灰活性和水泥石孔结构进行优化, 同时也助于提升早期的混凝土强度和防渗效果。Amir 等^[6]研究了活化煤矸石粉作为填料替代沥青混合料中常规矿物填料的适用性, 证明了含有煤矸石粉的沥青混合料表现出优异的温度稳定性和弹性模量; 张凯等^[7]基于响应面的中心复合试验法设计试验, 以煤矸石粉细度和掺量为影响因素, 通过对砂浆流动性、不同龄期抗压和抗折强度响应值的分析, 发现煤矸石粉细度或掺量单一因素对砂浆流动性和强度有着极为显著的影响并且两者交互作用影响显著, 当细度为 $8.00 \mu\text{m}$ 、掺量 15.49% 时, 各响应值达到最大; 张亚婕等^[8]采

用不同比例的煤矸石粉替代矿粉, 对 AC-16 沥青混合料的路用性能进行分析。通过试验发现替代率为 40% 煤矸石粉沥青混合料路用性能最优; 微观试验发现煤矸石粉较矿粉比表面积大、强度低等优点, 因此可显著改善沥青混合料的路用性能。阎杰等^[9-10]研究了煤矸石粉取代率对煤矸石混凝土强度的影响, 结果表明煤矸石粉取代率为 15% 时, 煤矸石混凝土的抗压强度、抗拉强度、抗折强度最大; 贾悦等^[11]选取不同煤矸石粉替代微表处混合料的填料, 探究煤矸石粉对微表处混合料路用性能和层间性能的影响。结果表明煤矸石粉替代矿粉作为填料使用于微表处, 可提高微表处的高温性能、水温性能及耐磨耗性能, 并且高温活化煤矸石粉改善效果更好; 冯新军等^[12-14]通过比较不同煤矸石粉与石灰石粉的沥青胶浆性能, 发现煤矸石粉较石灰石粉粒度更小, 比表面积更大, 表面更粗糙, 使其与沥青交互能力更强, 从而显著提高沥青胶浆的高温性能, 并改善了其黏温特性, 但低温性能有所降低; 吴金荣等^[15-16]通过在沥青混合料中掺加煤矸石粉和聚酯纤维, 发现适量的煤矸石粉和聚酯纤维可以提高沥青混合料的抗弯性能和抗裂性能。

综上所述, 已有大量文献对煤矸石粉的资源化利用进行了研究, 如改良膨胀土、改性混凝土和沥青路面等。但是将煤矸石粉作为填料用于改性橡胶沥青混合料的研究却鲜有报道。选择 ARHM-13 (W) 级配进行设计, 填料种类为石灰石粉 (LS)、煤矸石粉 (CGP)。通过马歇尔试验的物理力学指标确定两种填料下的最佳油石比。对两种填料制备的橡胶沥青混合料进行车辙试验、小梁弯曲试验和冻融劈裂试验, 对比分析动稳定度、弯曲劲度模量、冻融劈裂强度等指标, 探究煤矸石粉代替石灰石粉对橡胶

材料科学

沥青混合料路用性能的影响。

1 试验材料及试验方法

1.1 主要原料

选用橡胶粉掺量为 20% 的橡胶沥青, 具体指标见表 1。

表 1 橡胶沥青主要技术指标

Table 1 Main technical indexes of rubber asphalt

软化点/℃	延度 (5 cm/min, 5 ℃) /cm	针入度 (25 ℃) / 0.1 mm	180 ℃ 旋转 黏度 / (mPa · s)
67	6.7	41.9	1.8×10^3

填料选用石灰石粉和煤矸石粉, 为排除两种矿粉中颗粒大小不同对混合料性能的影响, 将两种矿粉均过 0.075 mm 筛后用于试验。技术性能指标见表 2。

表 2 填料的技术性能指标

Table 2 Technical performance indicators of fillers

填料类型	表观密度 / (g/cm ³)	<0.075 mm 含量/%	亲水系数
LS	2.74	98	0.83
CGP	2.27	100	0.77

集料中细集料规格为 0~3、3~5 mm 的石灰岩, 粗集料为 5~10、10~15 mm 的玄武岩, 各档集料的技术指标均满足 JTG F40—2004 《公路沥青路面施工技术规范》要求。

1.2 级配

所选级配为 ARHM-13 (W), 根据级配范围合成级配的各筛孔通过率见表 3。

表 3 ARHM-13 (W) 合成级配

Table 3 Synthetic grading of ARHM-13 (W)

筛孔尺寸/mm	级配上限/%	级配下限/%	合成级配/%
16	100	100	100
13.2	100	90	95.8
9.5	71	62	66.1
4.75	35	25	22.9
2.36	28	20	24
1.18	23	15	20
0.6	19	12	15.5
0.3	15	10	11.3
0.15	12	8	9.1
0.075	10	6	6.4

1.3 试验方法

1.3.1 混合料制备

先将橡胶沥青置于 180 ℃ 的烘箱中加热 5 h, 矿料置于温度为 170 ℃ 的烘箱中烘 5 h, 煤矸石粉需在 (105 ± 5) ℃ 烘箱中烘干 0.5 h, 拌和锅预热到 170 ℃。采取干法工艺, 先将矿料倒入拌和锅干拌 60 s, 再加

入橡胶沥青拌 90 s, 最后加入煤矸石粉拌 90 s, 出料温度控制在 170~180 ℃ 之间。

1.3.2 试验内容

填料微观性能: 为了探究煤矸石粉对沥青混合料的改性机理, 通过扫描电镜试验和 X 射线荧光光谱 (XRF) 试验, 对比煤矸石粉和矿粉的微观形貌和化学组成。

最佳油石比下不同填料沥青混合料力学性能: 分别制作最佳油石比下的两种填料的沥青混合料标准马歇尔试件。通过各项马歇尔性能试验, 测得空隙率、稳定度等指标, 对比两种填料的沥青混合料物理力学指标。

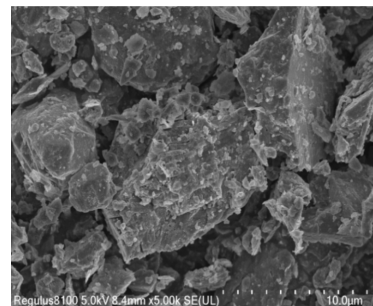
路用性能: 路用性能包括高温稳定性, 低温抗裂性和水稳定性, 通过车辙试验、小梁弯曲试验和冻融劈裂试验研究煤矸石粉填料对沥青混合料高温性能和水稳定性性能的影响。

2 试验结果及分析

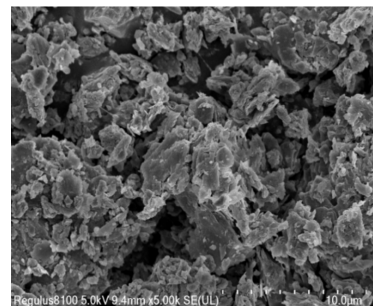
2.1 微观试验

2.1.1 扫描电镜试验

观察放大 5 000 倍的 LS 和 CGP 微观结构, 如图 1 所示。



(a) LS



(b) CGP

图 1 放大 5 000 倍后的微观形貌图

Fig. 1 Microscopic morphology after 5 000 times magnification

相较于 LS, CGP 表面构造更丰富, 粒度更小, 因此导致比表面积更大。煤矸石粉的片状结构和吸附特性对限制沥青中轻质组分的流动和挥发起着至关重要的作用^[17]。

2.1.2 XRF 试验

LS 和 CGP 的化合物相对含量见表 4。

表 4 主要化学成分相对含量

填料类型	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO
LS	2.38	4.64	0.65	0.52	16.8
CGP	24.08	30.42	0.52	0.41	2.2

CGP 较 LS 含有更多的 SiO₂ 和 Al₂O₃ 等活性氧化物, 这些活性氧化物可以促进沥青与填料之间的酸碱反应, 从而改善沥青混合料的路用性能。

2.2 马歇尔试验

最佳油石比下不同填料的橡胶沥青混合料物理力学指标见表 5。

表 5 最佳油石比下不同填料的橡胶沥青混合料物理力学参数
Table 5 Physical and mechanical parameters of rubber asphalt mixture with different fillers under optimal ratio of oil stone

填料类型	油石比/%	矿料间隙率/%	空隙率/%	沥青饱和度/%	稳定度/kN	流值/mm
LS	5.00	17.1	3.75	78.9	12.7	3.0
CGP	5.10	17.0	3.69	78.3	13.5	3.4

煤矸石粉较石灰石粉填料制作的混合料油石比有所增加, 其原因为煤矸石粉的物化性质导致其需要吸附更多的橡胶沥青; 煤矸石粉较石灰石粉填料制作的混合料的空隙率和矿料间隙率产生微小差异的原因可能是两种填料表面构造、粒度不同; 与石灰石粉橡胶沥青混合料相比, 煤矸石粉橡胶沥青混合料的稳定度提高了 6.3%, 这表明煤矸石粉代替矿粉后, 混合料高温性能更优。

2.3 路用性能试验

2.3.1 高温稳定性

标准试件 (30 cm × 30 cm × 50 cm) 在试验温度为 60 °C 下进行车辙试验, 得到两种填料下沥青混合料的车辙试验结果, 如图 2 所示。

煤矸石粉填料橡胶沥青动稳定度较石灰石粉填料橡胶沥青提高 18.8%, 永久变形降低 9.8%, 这表明煤矸石粉作为填料可以提高橡胶沥青混合料的高温性能。其原因是煤矸石粉含有较多的活性氧化物, 在微粉状态下与水、CaO 可以产生胶结物, 有助于提高填料-沥青的黏结力; 由于煤矸石粉较石灰石粉

的表面构造更加丰富, 使其吸附了更多的橡胶沥青, 使得结构沥青的比例增加; 而且由于表面的构造使煤矸石粉与橡胶沥青之间的机械咬合力更强, 导致橡胶沥青胶浆的黏结力更强, 进而在混合料中对集料的黏结性更强, 抵抗变形的能力增大。

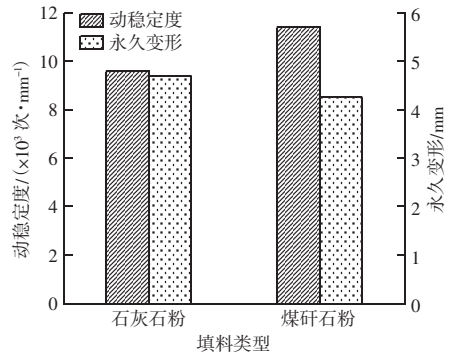


图 2 车辙试验结果

Fig. 2 Rutting test results

2.3.2 低温抗裂性

将成型好的车辙板试件经切割机切成长 25 cm、宽 3 cm、高 3.5 cm 的小梁试件, 在温度为 -12 °C 的环境下进行试验, 两种填料沥青混合料的低温小梁弯曲试验结果如图 3 所示。

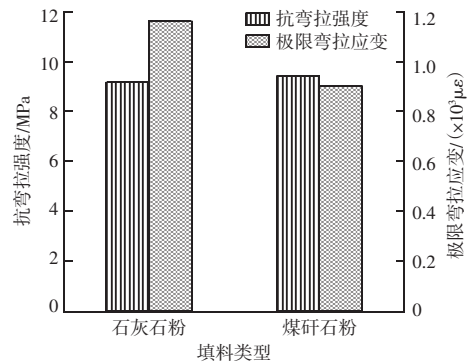


图 3 低温弯曲试验结果

Fig. 3 Low temperature bending test results

发现煤矸石粉填料沥青混合料较石灰石粉填料沥青混合料极限弯拉应变降低 22.2%, 而弯曲劲度模量提高 31.8%。这表明煤矸石粉作为填料使混合料整体刚度增加、脆性增强, 一旦达到极限弯拉强度就会发生脆性破坏。这是由于煤矸石粉吸附了橡胶沥青胶浆中的大量自由沥青, 虽然其黏结力提高, 但是其内部致密, 自由沥青的减少导致橡胶沥青胶浆的变形能力降低, 进而影响橡胶沥青混合料的低温性能。

材料科学

2.3.3 水稳定性

两种填料沥青混合料的冻融劈裂试验结果如图4所示。

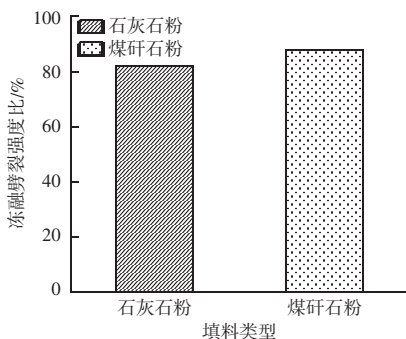


图4 水稳定性试验结果

Fig. 4 Water stability test results

煤矸石粉填料橡胶沥青混合料和石灰石粉填料橡胶沥青混合料的劈裂强度比均满足规范要求,煤矸石粉橡胶沥青混合料的劈裂强度比更大,提高7.1%,表明其水稳定性更优,因为煤矸石粉中的活性 Al_2O_3 和 SiO_2 成分,会与进入到混合料孔隙的水和自身含有的少量 CaO 产生胶结物,表现为微弱的水硬性,提高沥青和填料的黏结力,进而提高改性沥青混合料的水稳定性。

3 结论

通过研究煤矸石粉代替石灰石粉对橡胶沥青混合料路用性能的影响,主要得到以下结论:

(1) 煤矸石粉较石灰石粉的表面构造更加复杂,含有鳞片状结构,大大的提高了比表面积。此外,煤矸石粉较石灰石粉含有更多的 SiO_2 和 Al_2O_3 等活性氧化物。这些物化性质表明煤矸石粉可以作为良好的填料。

(2) 石灰石粉填料橡胶沥青混合料最佳油石比5.00%,煤矸石粉填料橡胶沥青混合料最佳油石比5.10%。煤矸石粉作为填料的混合料最佳油石比有所增加。

(3) 煤矸石粉填料橡胶沥青动稳定度较石灰石粉填料橡胶沥青提高18.8%,永久变形降低9.8%,劈裂强度比提高7.1%,表明经过煤矸石粉填料改性后混合料的高温性能和水稳定性提高;低温抗裂性则略有降低。

(4) 煤矸石粉较矿粉表面构造更加复杂,且含有更多的 SiO_2 和 Al_2O_3 等活性氧化物,煤矸石粉替代矿粉可较好地提高橡胶沥青混合料的高温性能和水

稳定性能,研究成果为煤矸石的资源化利用和橡胶沥青性能提升提供一定的参考,对环境保护和工程质量的提升具有一定的推动作用。

参考文献

- [1] 金娇,刘帅,钱国平,等. 活化煤矸石协同胶粉改性沥青交互特性研究[J]. 中国公路学报, 2023, 36(12): 155-170.
- [2] SHEN L L, ZHANG J X, LAI W A, et al. Microstructure and mechanical behaviors of coal gangue - Coal slime water backfill cementitious materials [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 20: 3772-3783.
- [3] 李振,雪佳,朱张磊,等. 煤矸石综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(6): 165-178.
- [4] 马宾辉,曾星,郭佳乐,等. 煤矸石粉改良膨胀土的试验[J]. 矿业工程研究, 2019, 34(3): 66-72.
- [5] 金阳,胡连超,王立志,等. 自燃煤矸石作矿物掺合料对混凝土性能的影响[J]. 混凝土, 2021, (9): 86-89.
- [6] AMIR M, MORTEZA R, POOYAN A. Effect of coal waste powder in hot mix asphalt compared to conventional fillers: mix mechanical properties and environmental impacts [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 91: 262-268.
- [7] 张凯,周梅,李超,等. 基于RSM-CCD的自燃煤矸石粉-水泥砂浆配比优化[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(3): 299-309.
- [8] 张亚婕,白领群,吕海将,等. 煤矸石粉沥青混凝土路用性能试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2022, 42(5): 33-42.
- [9] 阎杰,单豆豆,邢国斌,等. 活化煤矸石粉作为矿物掺合料对煤矸石混凝土性能的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2023, 42(3): 266-273.
- [10] 阎杰,邢国斌,左军鹏,等. 活化煤矸石粉对煤矸石混凝土性能的影响[J]. 森林工程, 2023, 39(5): 190-196.
- [11] 贾悦,赵兴晨,罗要飞. 煤矸石粉对微表处路用和层间耐久性影响[J]. 森林工程, 2024, 40(4): 196-203.
- [12] 冯新军,赵梦龙,陈旺,等. 煤矸石粉沥青胶浆路用性能及微观机理研究[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(1): 113-119.
- [13] 冯新军,陈旺,李旺. 硅烷偶联剂改性煤矸石粉沥青胶浆路用性能及改性机理[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(5): 1121-1129, 1152.
- [14] 冯新军,解明卫,陈旺,等. 活化煤矸石粉SBS改性沥青胶浆路用性能和改性机理[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(6): 1440-1449.
- [15] 吴金荣,崔善成,洪荣宝,等. 煤矸石粉/聚酯纤维沥青混合料盐蚀抗弯性能[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(5): 1167-1176.
- [16] 吴金荣,崔善成,李飞,等. 煤矸石粉/聚酯纤维沥青混合料低温抗裂性研究[J]. 材料导报, 2021, 35(6): 6078-6085.
- [17] LIU S, YU H Y, GAO Y C, et al. Performance enhancement of modified asphalt via coal gangue with microstructure control [J]. Construction and Building Materials, 2023, 367: 130287.