

不同老化条件下粉煤灰沥青混合料路用性能评价

Evaluation of Road Performance of Fly Ash Asphalt Mixture under Different Aging Conditions

吕 珩

(郑州市公路工程公司, 郑州 450000)

摘 要: 为了研究不同老化条件下粉煤灰对沥青混合料性能的影响, 以粉煤灰部分替代矿粉制定了 4 个掺配比例, 并设计了三种老化条件, 采用 70 °C 高温车辙试验、-10 °C 小梁弯曲试验以及浸水马歇尔试验与冻融劈裂试验, 系统评价了不同粉煤灰-矿粉比例的沥青混合料路用性能。结果表明: 掺入粉煤灰可改善沥青混合料的高温性能与水稳定性, 存在最佳掺量区间, 且不同性能最佳掺量区间存在差异; 粉煤灰会对沥青混合料低温性能产生不利影响, 且掺量越大影响越显著; 老化程度越大, 沥青混合料各路用性能均显著降低。采用粉煤灰进行沥青混合料性能改善时, 粉煤灰掺量应结合各路用性能进行综合确定。研究成果为粉煤灰在沥青路面的应用提供参考。

关键词: 道路工程; 沥青混合料; 粉煤灰; 老化; 路用性能

中图分类号: U415

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 02-0156-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.02.026

LV Heng

(Zhengzhou Highway Engineering Company, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to study the influence of fly ash on the performance of asphalt mixture under different aging conditions, four blending ratios were formulated by partially replacing mineral powder with fly ash, and three aging conditions were designed. The high temperature rutting test at 70 °C, the beam bending test at 10 °C, the immersion Marshall test and the freeze-thaw splitting test were used to systematically evaluate the road performance of asphalt mixture with different fly ash-slag ratio. The results show that the high temperature performance and water stability of asphalt mixture can be improved by partially adding fly ash. There is an optimal dosage range, and there are differences in the optimal dosage range of different properties. Fly ash will have an adverse effect on the low temperature performance of asphalt mixture, and the greater the content, the more significant the effect. The greater the degree of aging, the road performance of asphalt mixture is significantly reduced. When using fly ash to improve the performance of asphalt mixture, the content of fly ash should be determined comprehensively according to the road performance. The research findings provide a reference for the application of fly ash in asphalt pavement.

Key words: road engineering; asphalt mixture; fly ash; aging; road performance

0 引言

沥青路面以其良好的行车舒适性、养护便利性 & 噪音小等优点, 逐渐成为了高等级公路的首选路面形式^[1]。沥青混合料设计理念中, 根据沥青胶浆三级理论, 填料在改善沥青混合料和易性和稳定性方面发挥着重要作用^[2]。传统沥青混合料设计时,

一般选用研磨的石灰岩矿粉作为填料。但与集料一样，作为不可再生资源，石料的来源及经济性受环保政策等影响较大。近年来，考虑到沥青路面的使用性能，工业废弃物部分替代矿粉得到了较多关注^[3-4]。我国 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》规定，可以用粉煤灰代替部分矿粉。作为填料的一部分，粉煤灰可提高沥青与酸性集料的黏附性，从而提高混合料的水稳定性^[5]。因此在炎热潮湿的地区，采用粉煤灰部分代替矿粉作为沥青路面的填料已成为一种较为普遍的做法。

沥青材料抗老化性能是影响沥青混合料服役寿命的关键因素之一^[6]，但目前老化研究主要集中于沥青或沥青胶浆的性能影响评价。如张恒龙等^[7]研究了氧化锌/膨胀蛭石复合材料组分协同对沥青老化行为的影响规律，发现其能有效提升沥青耐老化性能；金娇等^[8]研究了不同类型有机蒙脱土对沥青胶浆老化后流变性能影响，并进行分子动力学模拟分析，发现合理选择 OMMT 改性剂有利于提升改性沥青的抗老化性能；胡栋梁等^[9]探讨了原样沥青、热老化沥青和紫外老化沥青的表面化学官能团变化及老化程度，发现紫外老化沥青老化程度较高；屈鑫等^[10]基于宏观、微观和数值模拟等沥青老化技术评估方法，对道路沥青的评估方法适用性进行对比分析；袁浩等^[11]将超声处理技术应用于 SBS 改性沥青的制备过程中，并对在不同老化程度下的 SBS 改性沥青进行性能分析，结果表明超声处置作用可以提升 SBS 改性沥青的抗疲劳和耐老化能力。综合而言，目前对沥青混合料老化后的影响研究仍处于起步阶段，而针对以粉煤灰作为矿粉替代物的老化影响评价研究更为欠缺^[12-13]。因此，为探究掺粉煤灰沥青混合料的长期使用性能，有必要对粉煤灰部分替代矿粉后沥青混合料在老化条件下的路用性能进行深入研究。

基于上述分析，以粉煤灰部分或全部替代矿粉，通过高温车辙试验、小梁弯曲试验以及浸水马歇尔试验与冻融劈裂试验，系统评价不同老化条件、不同粉煤灰-矿粉比例条件下沥青混合料路用性能。以期粉煤灰在沥青路面方面的应用提供借鉴。

1 试验材料与设计

1.1 原材料

采用壳牌（I-D 型）SBS 改性沥青，主要性能

指标见表 1。粗集料、细集料采用石灰岩集料，粗集料规格分别为 3~5、5~10、10~20 mm，各项技术指标见表 2；细集料为 0~3 mm，表观相对密度为 2.728 g/cm³，砂当量为 88%，<0.075 mm 颗粒含量为 0.4%；填料分别采用石灰岩研磨矿粉以及粉煤灰，两种填料技术指标见表 3。

表 1 SBS 改性沥青的性能指标					
Table 1 Performance index of SBS modified asphalt					
25 ℃ 针入度 / (0.1mm)	软化点 /℃	5 ℃ 延度 /cm	闪点 /℃	25 ℃ 密度 / (g/cm ³)	25 ℃ 弹性 恢复率
54	86	32.5	244	99.89	94

表 2 粗集料性能指标							
Table 2 Performance indexes of coarse aggregate							
粒径 /mm	压碎值 /%	洛杉矶 磨耗损 失/%	表观相 对密度	吸水率 /%	<0.075 mm 颗粒 含量	针片状 含量 /%	与沥青 黏附 等级
3~5			2.745	0.25	0.3		
5~10			2.742	0.25	0.2	4.2	
10~20	19.5	18.5	2.739	0.21	0.1	3.8	5

表 3 矿粉和粉煤灰的基本性能						
Table 3 Basic properties of slag and fly ash						
填料 类型	表观密度 / (g/cm ³)	比表面积 / (cm ² /g)	含水率 /%	各筛孔通过率/%		
				0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
矿粉	2.741	3 394	0.1	100	98.4	94.4
粉煤灰	2.978	3 724		100	99.4	97.5

研究采用 AC-20 级配进行沥青混合设计，合成级配曲线如图 1 所示。采用马歇尔设计法进行配合比设计，沥青混合料最佳油石比确定为 4.2%。

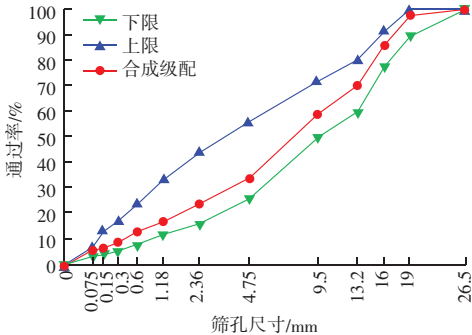


图 1 合成级配曲线
Fig. 1 Composite gradation curve

1.2 试验设计

为研究老化对沥青混合料性能影响，设计了 3 种不同老化程度的 SBS 改性沥青，分别为：①未老化；②短期老化——RTFOT 旋转薄膜老化，老化温度为 163 ℃、老化时间为 5 h，用于模拟沥青混合料拌和、施工及碾压等施工阶段发生的老化过程；③长期老化——在 RTFOT 短期老化基础上进行 PAV 压力老

道桥技术

化,老化温度为 163 ℃、压强为 2.1 MPa、老化时间为 20 h,用于模拟沥青混合料在施工及 3~5 年服役阶段发生的老化过程^[14-15]。将各沥青试样老化处理后备用。根据粉煤灰与矿粉比例,设计粉煤灰占填料总质量比为 25%、50%、75%、100% 四个不同掺量和 1 个空白对照组。

根据上述填料比例及老化程度组合,分别制备对应沥青混合料试件,参照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》分别进行相关路用性能测试。主要包括:70 ℃高温车辙试验、-10 ℃低温小梁弯曲试验、水稳定性试验(包括浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验)。

2 结果与讨论

2.1 高温抗车辙性能

对于改性沥青混合料而言,传统 60 ℃试验条件下的车辙试验结果往往偏高,导致试验结果与高温稳定性能之间的区分度较低,且该试验温度与我国南方等部分地区最高服役温度不符。因此,此次研究采用短期老化条件下 70 ℃温度进行车辙试验。试验结果如图 2 所示。

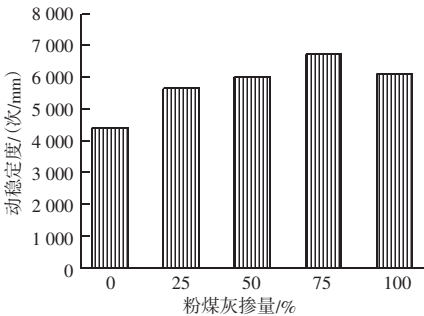
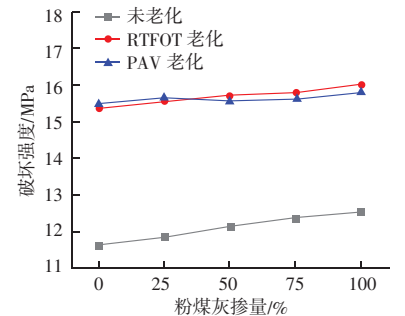


图2 70 ℃高温车辙试验稳定度测试结果
Fig. 2 70 ℃ high temperature rutting test stability test results

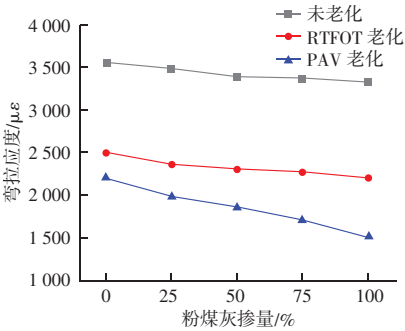
随着粉煤灰掺量的增加,改性沥青混合料的高温稳定性总体呈上升趋势。即添加粉煤灰作为填料有利于提高沥青混合料的高温稳定性。当粉煤灰占比为 75% 时,动稳定度到最高值,此时较全部采用矿粉的沥青混合试样提升 51.9%。但粉煤灰完全取代矿粉后,动稳定度下降,且动稳定度仍较空白组试样高 38.4%。这意味着在一定掺量范围内,粉煤灰的掺入可以显著提高混合料的高温稳定性。当完全采用粉煤灰为填料时,高温稳定性开始下降,但仍高于全部采用矿粉作为填料的沥青混合料。

2.2 低温抗裂性能

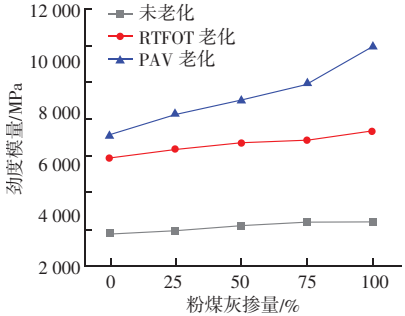
沥青混合料的低温抗裂性能一般采用小梁试件在 -10 ℃ 条件下的破坏应变进行评价,如图 3 所示。随着粉煤灰掺量增大,小梁试样的破坏强度和劲度模量均有所增加,同时弯拉应变减小;其中较未老化试样而言,粉煤灰掺量对老化试样的破坏强度影响较小,且粉煤灰填料对改性沥青混合料破坏强度的影响会随着老化程度的增加而减小。由图 3 (b) 可知,弯拉应变随着粉煤灰掺量的增加而逐渐减小。在长期老化试验组中,该曲线表现出较高的斜率,弯曲应变显著下降。因此,掺加粉煤灰会大大降低受损试样的最大弯拉应变,这一点随着老化时间的



(a) 破坏强度



(b) 弯拉应变



(c) 劲度模量

图3 不同老化条件下沥青混合料的低温弯曲试验结果
Fig. 3 Low temperature bending test results of asphalt mixture under different aging conditions

延长会变得更加明显。从图 3（c）可看出，劲度模量随着粉煤灰含量的增加而增加，并且随着老化时间的延长而变化更大。综合低温弯曲试验表明，未老化或短期老化的沥青混合料的低温抗裂性随粉煤灰掺量的增加而略有变化。但是，当沥青混合料发生严重老化时，掺加粉煤灰会在一定程度上使沥青混合料变脆，从而降低沥青混合料的低温抗裂性能。

2.3 水稳定性

2.3.1 浸水马歇尔试验

浸水马歇尔试验结果如图 4 所示。随着粉煤灰掺量的增加，沥青混合料的残留稳定度有所提高，且当粉煤灰掺量为 50%、75% 时，残留稳定度达到最大值。为了比较和分析粉煤灰对不同老化度沥青混合料水稳定性的改善效果，计算了同一试验组中残留稳定性最大值和最小值（即采用矿粉试件）之间的差值。通过比较三个老化程度残留稳定度差值，发现老化后粉煤灰对水稳定性的改善作用减弱。粉煤灰对水稳定性的改善效果比未老化条件下降低了 42 %。

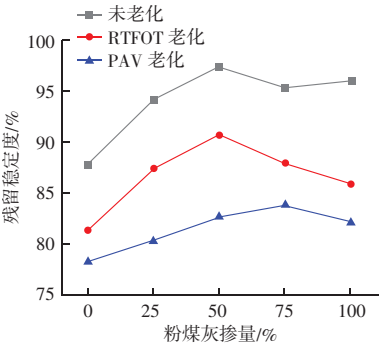


图 4 不同老化条件下沥青混合料的低温弯曲试验结果
Fig. 4 Low temperature bending test results of asphalt mixture under different aging conditions

2.3.2 冻融劈裂试验

冻融劈裂试验结果如图 5 所示。粉煤灰替代矿粉可以改善沥青混合料的水稳定性，但在不同的老化条件下，其影响程度不同。其中，在未老化和短期老化试验组中，当粉煤灰掺量为 75% 时，劈裂强度比达到最大值；在长期老化试验组中，粉煤灰在 25%~75% 的掺量范围内差异较小；当粉煤灰完全取代矿粉时，劈裂强度比则下降。从沥青混合料的长期水稳定性结果来看，建议粉煤灰掺量不得超过 75%。

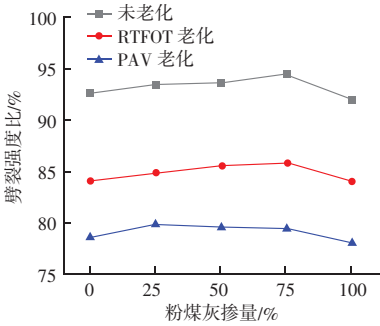


图 5 不同老化条件下沥青混合料冻融劈裂试验结果
Fig. 5 Freeze-thaw splitting test results of asphalt mixture under different aging conditions

3 结论

通过 70 ℃ 高温车辙试验、-10 ℃ 小梁弯曲试验及水稳定性性能试验，对不同老化条件、不同粉煤灰-矿粉比例条件下的沥青混合料路用性能进行评价，得到以下主要结论：

- (1) 短期老化条件下，粉煤灰可以提高沥青混合料的高温稳定性，且在掺量为 75% 时改善效果最佳。
- (2) 小梁弯曲试验中，粉煤灰可以提高沥青混合料的破坏强度、劲度模量，但显著降低混合料的破坏应变，且老化程度越高劣化影响越显著。
- (3) 粉煤灰可以提高沥青混合料的水稳定性，最佳掺量在 50% 左右。且随着老化程度增加，沥青混合料水稳定性显著降低。

参 考 文 献

[1] 编辑部中国公路学报. 中国路面工程学术研究综述·2020 [J]. 中国公路学报, 2020, 33 (10): 1-66.

[2] 牛永宏, 唐德密. 粉胶比对 SBS 改性沥青胶浆力学性能的影响分析 [J]. 施工技术, 2017, 46 (15): 88-92.

[3] 游庆龙, 吕政桦, 覃潇, 等. 矿粉细度及粉胶比对沥青胶浆力学性能的影响 [J]. 公路, 2016, 61 (11): 204-208.

[4] 柳浩, 李晓民, 张肖宁, 等. 消石灰与矿粉沥青胶浆流变性能比较 [J]. 北京工业大学学报, 2009, 35 (11): 1506-1511.

[5] 孙磊, 曹小虎, 陈红宾, 等. 石灰粉煤灰稳定砂砾替代水稳道路基层的施工技术 [J]. 建筑技术开发, 2019, 46 (20): 112-113.

[6] TANG D, ZHAO Y, XU G, et al. Research on the adsorption capacity between asphaltene and resin in asphalt with different aging degree: Experimental study and quantum-mechanical calculation [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 415: 137651.

[7] 张恒龙, 段海辉, 罗尧. 氧化锌/膨胀蛭石复合材料组分协同增效延缓沥青老化行为研究 [J]. 中国公路学报, 2023: 1-16.

研究与应用

面冻融裂缝红外图像的精准检测,体现了良好的鲁棒性,推动智能道路维护技术的发展。

参 考 文 献

[1] 黄俊博, 宁宝宽, 李明烁, 等. 既有裂缝混凝土的冻融劣化及损伤特性分析 [J]. 工业建筑, 2020, 50 (1): 142-147.

[2] 郭香蓉, 李鸿. 一种基于集成学习的路面裂缝检测仿真算法 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (2): 121-125.

[3] 李太文, 范昕炜. 基于 Faster R-CNN 的道路裂缝识别 [J]. 电子技术应用, 2020, 46 (7): 53-56, 59.

[4] 马跃坤, 李再伟, 赵彦旭, 等. 无砟轨道板表面裂缝的红外热成像检测方法 [J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19 (3): 579-587.

[5] 白锋, 马庆禄, 赵敏. 面向航拍路面裂缝检测的 AC-YOLO [J]. 计算机工程与应用, 2025, 61 (1): 153-164.

[6] 赵志宏, 何朋, 郝子晔. 一种道路裂缝检测的变尺度 VS-UNet 模型 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2024, 51 (6): 63-72.

[7] 张明星, 徐健, 刘秀平, 等. 改进 U-Net 的路面裂缝检测方法 [J]. 计算机工程与应用, 2024, 60 (24): 306-313.

[8] 邓治林, 罗仁泽, 费越, 等. 基于 FE-Unet 的机场道面裂缝检测 [J]. 光电子. 激光, 2023, 34 (1): 34-42.

[9] 龚芳媛, 方冰杰, 程雪佼, 等. 基于改进 YOLOv5 的路面裂缝检测算法 [J]. 大连理工大学学报, 2024, 64 (3): 314-322.

[10] 李禹萱, 宋伟东, 孙尚宇, 等. 基于改进 Swin-Transformer 的农村路面裂缝检测算法 [J]. 北京交通大学学报, 2024, 48 (5): 88-97.

[11] 刘震, 顾兴宇, 李骏, 等. 探地雷达数值模拟与道路裂缝图像检测的深度学习增强方法 [J]. 地球物理学报, 2024, 67 (6): 2455-2471.

[12] 何礼. 基于深度学习的光学元件表面缺陷检测技术研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2023.

[13] 孙朝云, 马志丹, 李伟, 等. 基于深度卷积神经网络融合模型的路面裂缝识别方法 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2020, 40 (4): 1-13.

(上接第 66 页)

续施工引起的地表变形现场试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18 (3): 982-988, 996.

[7] 张子新, 李佳宇. MJS 法地基处理技术综述与应用 [J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39 (6): 1-11.

[8] 姚志雄, 夏华灿, 吴波, 等. MJS 工法桩在滨海地区软基加固工程中的应用 [J]. 人民长江, 2023, 54 (10): 141-149.

[9] 陈光辉, 李永胜, 赵建勋, 等. MJS 加固桩在砂层地质施工技术研究 [J]. 建筑结构, 2023, 53 (增刊 2): 2043-2045.

[10] 徐敏, 王敬敬, 徐国胜. MJS 工法桩加固施工对运营隧道的影响研究 [J]. 地基处理, 2023, 5 (增刊 1): 131-137.

[11] 邵耀锋, 何猷豪, 郭健宝, 等. MJS 加固范围对隧道和地表变形影响 [J]. 建筑结构, 2021, 51 (增刊 2): 1402-1406.

[12] 王怀东, 袁云辉, 王二丽. MJS 工法在盾构上跨隧道工程中的应用研究 [J]. 现代交通技术, 2021, 18 (6): 22-27.

[13] 牛自强. MJS 工法与管幕法处理基坑上跨运营地铁扰动效应研究 [J]. 铁道建筑技术, 2022 (3): 120-124.

[14] 张文博, 张康, 陈卫军. MJS 工法在富水砂层隧道密贴下穿既有车站工程中的应用 [J]. 现代城市轨道交通, 2018 (10): 35-38.

[15] 王中兵, 王自强. 承压富水软土地层中暗挖车站下穿运营车站的水平 MJS 加固 [J]. 建筑施工, 2022, 44 (7): 1489-1492.

[16] 王恩波, 胥文博, 张喆, 等. 基坑开挖对下卧地铁隧道结构的扰动效应分析 [J]. 甘肃科学学报, 2024, 36 (5): 16-23.

(上接第 159 页)

[8] 金娇, 高玉超, 李锐, 等. 有机蒙脱土改性沥青抗老化性及其分子模拟试验研究 [J]. 中国公路学报, 2022: 1-19.

[9] 胡栋梁, 顾兴宇, 孙丽君, 等. 基于量子化学的沥青热老化与紫外老化机理 [J]. 交通运输工程学报, 2023, 23 (2): 141-152.

[10] 屈鑫, 丁鹤洋, 汪海年. 道路沥青老化评价方法研究进展 [J]. 中国公路学报, 2022, 35 (6): 205-220.

[11] 袁浩, 王黎明, 宋子坤, 等. 超声处置对 SBS 改性沥青抗疲劳和耐老化能力影响的分析 [J]. 合成材料老化与应用, 2024, 53 (4): 25-28, 88.

[12] 黄开棧. 填料对 SBS 改性沥青涂盖料老化性能的影响 [J]. 福

建建材, 2023 (4): 11-13.

[13] 齐辉, 吴银芳, 徐懿梦, 等. 沥青混合料动态模量预测模型构建研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (6): 79-83, 134.

[14] VURAL KÖK B, GÜRÇAY ÖZDEMİR N. Performance evaluation of crumb rubber and bio-based polyurethane compound in terms of rheological and aging properties of asphalt binder [J]. Construction and Building Materials, 2023, 389: 131759.

[15] XIANG H, HE Z, TANG H, et al. Effects of thermo-oxidative aging on the macrophysical properties and microstructure of asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2023, 395: 132315.