

市政道路薄层沥青混合料中粉煤灰的应用研究

文 欣

深圳市路桥建设集团有限公司, 广东 深圳

收稿日期: 2025年3月21日; 录用日期: 2025年4月12日; 发布日期: 2025年4月23日

摘 要

在市政道路建设中对薄层沥青混合料性能要求越来越高, 传统材料存在耐久性与稳定性问题。为提升薄层沥青混合料性能, 选用不同掺量的废弃矿渣-粉煤灰等质量取代部分矿粉, 通过配合比设计探究其在薄层沥青混合料中的作用机制和应用效果。结果显示, 粉煤灰对混合料高温稳定性、低温抗裂性及水稳定性均有改善作用, 高温下掺量至20%时动稳定度最优, 低温抗裂性随掺量上升而增强, 水稳定性在20%~30%掺量时较好, 且0%~30%掺量下抗滑性能达标。研究明确了粉煤灰在市政道路薄层沥青混合料中的最佳掺量范围, 为道路建设的绿色高效发展提供技术与理论支撑, 助力道路建设质量提升与环保推进。

关键词

薄层沥青混合料, 粉煤灰, 配合比, 路用性能

Research on the Application of Fly Ash in Thin Layer Asphalt Mixture for Municipal Roads

Xin Wen

Shenzhen Road & Bridge Construction Group Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

Received: Mar. 21st, 2025; accepted: Apr. 12th, 2025; published: Apr. 23rd, 2025

Abstract

The performance requirements for thin-layer asphalt mixtures are becoming increasingly high in municipal road construction, and traditional materials have durability and stability issues. To improve the performance of thin-layer asphalt mixture, different dosages of waste slag fly ash and other materials are selected to replace some mineral powder. The mechanism and application effect

of waste slag fly ash in thin-layer asphalt mixture are explored through mix design. The results showed that fly ash had an improved effect on the high-temperature stability, low-temperature crack resistance, and water stability of the mixture. The optimal dynamic stability was achieved when the dosage was up to 20% at high temperatures, and the low-temperature crack resistance increased with the increase of dosage. The water stability was better at a dosage of 20%~30%, and the anti-skid performance met the standard at a dosage of 0%~30%. The study has clarified the optimal dosage range of fly ash in municipal road thin layer asphalt mixture, providing technical and theoretical support for the green and efficient development of road construction, and helping to improve the quality of road construction and promote environmental protection.

Keywords

Thin Layer Asphalt Mixture, Fly Ash, Mix Proportion, Road Performance

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概述

随着城市化进程的飞速推进，市政道路建设在追求高效与经济的同时，也被赋予了更高的质量要求和更严格的环保使命。在当前的建设环境下，薄层沥青混合料因其施工快速便捷、成本效益显著等优势，在市政道路的养护翻新以及新建工程中获得了广泛的应用空间。然而，传统的薄层沥青混合料在长期使用过程中逐渐暴露出耐久性欠佳和稳定性不足的问题，难以满足现代城市交通日益增长的需求，这促使科研人员不断探索新型材料和技术来加以改进[1] [2]。

近年来，国内部分研究聚焦于通过添加各类添加剂、纳米材料和纤维材料来改善其性能，如通过研发新型聚合物添加剂，可以提高沥青混合料的高温稳定性[3]，但成本较高且制备工艺复杂。利用纳米材料改性沥青，增强了混合料的低温性能[4]，不过纳米材料的分散均匀性控制难度较大。针对不同地区的气候条件和交通荷载特点，通过添加各类添加剂和纤维材料来改善其性能[5] [6]。然而，对于材料环保性的综合研究较少。粉煤灰作为一种工业废弃物，将其应用于薄层沥青混合料不仅能解决废弃物处理问题，还可能改善混合料性能。已有研究对粉煤灰在道路工程中的应用有所涉及[7]，但在市政道路薄层沥青混合料中的系统研究较少，且缺乏对其最佳掺量范围的精确定义。基于此背景，本文通过系统的试验研究，深入剖析废弃矿渣-粉煤灰在市政道路薄层沥青混合料中的作用机制和应用效果。明确其最佳掺量范围，为推动市政道路建设向绿色、高效、优质的方向发展提供坚实的技术支撑和理论依据。

2. 原材料

2.1. 沥青

本研究所用沥青为 70#沥青，其主要性能指标见表 1。

Table 1. Asphalt performance indicators

表 1. 沥青性能指标

检测项目	检测结果	技术要求
针入度(25℃, 100 g, 5 S)/0.1 mm	65.4	60~80
软化点/℃	48.2	≥46

续表

闪点/℃	280	≥260
延度(15℃, 5 cm/min)	>100	≥100

2.2. 集料

本研究粗集料选用为质地坚硬、耐磨性能良好的玄武岩，其主要性能指标见表 2。细集料采用机制砂和天然砂混合而成，机制砂的石粉含量为 8%，天然砂的细度模数为 2.6，两者搭配确保细集料具有良好的填充性能和级配分布，能有效填充粗集料间的空隙，提高混合料的密实度和稳定性[8]，优化施工和易性。矿粉为石灰岩矿粉，表观密度为 2.662 g/cm³。

Table 2. Asphalt performance indicators

表 2. 沥青性能指标

检测项目	检测结果	技术要求
压碎值/%	16	≤26
洛杉矶磨耗损失/%	19	≤28
针片状含量/%	7.6	≤15
表观相对密度 g/cm ³	2.863	≥2.6
坚固性/%	6.8	≤12

2.3. 粉煤灰

本研究所用粉煤灰为 II 级粉煤灰，其颗粒形态多为球形，表面光滑，如图 1 所示。这种特性使其在混合料中能够发挥填充和润滑作用[9]，改善混合料的工作性能，其潜在火山灰活性为与沥青的化学反应创造条件，进而提升混合料的路用性能。主要化学成分见表 3。



Figure 1. Grade II fly ash
图 1. II 级粉煤灰

Table 3. Main chemical components of fly ash

表 3. 粉煤灰主要化学成分

检测项目	单位	检测结果
SiO ₂	%	45.7

续表

Al ₂ O ₃	%	29.3
Fe ₂ O ₃	%	8.2
CaO	%	5.4
MgO	%	1.9
烧失量	%	5.0
活性指数(7 d)	%	65.5
活性指数(28 d)	%	80.6

3. 配合比设计

运用马歇尔设计方法，以设计空隙率 4%为目标，确定薄层沥青混合料的初始配合比。在此基础上，分别以 0%、10%、20%、30%、40%的粉煤灰等质量取代部分矿粉，制备不同粉煤灰掺量的沥青混合料试件，深入研究粉煤灰掺量对混合料性能的影响规律。

3.1. 级配设计

选用 AC-13 级配为参考范围，设计级配见表 4。

Table 4. Design grading of thin layer asphalt mixture
表 4. 薄层沥青混合料设计级配

筛孔尺寸/mm	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配上限	100	100	92	82	58	37	28	20	13	8	6
级配下限	100	90	79	66	38	22	15	10	6	4	3
设计级配	100	94.1	82.3	70.3	43.5	28.7	19.5	12.5	8.6	5.1	3.3

3.2. 最佳油石比

设置初选的油石比范围为 4.0%~5.5%之间，按照间隔 0.5%制作马歇尔标准试件，并进行马歇尔试验。试验结果见表 5。

Table 5. Marshall test results
表 5. 马歇尔试验结果

油石比/%	稳定度/kN	流值/mm	空隙率 VV/%	矿料间隙率 VMA/%	沥青饱和度 VFA/%
4.0	8.70	25.57	4.81	16.2	70.3
4.5	10.23	28.04	4.20	14.5	71.0
5.0	9.56	30.53	3.65	13.7	13.8
5.5	8.84	32.56	3.28	13.3	15.7

由试验结果表 5 可知，当油石比为 4.5%时，马歇尔稳定度达到较高值，流值在合理范围内，空隙率也最接近 4%，矿料间隙率和沥青饱和度也满足规范要求，综合各项指标，确定最佳油石比为 4.5%。

4. 路用性能试验

对不同掺量(0%、10%、20%、30%、40%)粉煤灰等质量取代部分矿粉的薄层沥青混合料进行性能试

验。通过高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性、抗滑性能来评价其路用性能。

4.1. 高温稳定性

采用高温车辙试验，在 60℃ 的试验温度和 0.7 MPa 的轮压条件下，测定沥青混合料试件的动稳定度。试验结果见图 2。

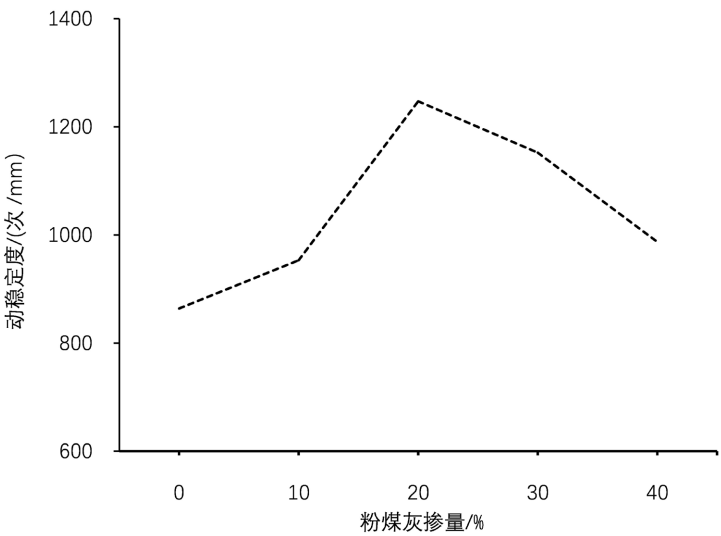


Figure 2. High temperature rutting test results
图 2. 高温车辙试验结果

如图 2 所示，随着粉煤灰掺量增加，动稳定度先上升后下降，当掺量为 20% 时达到最大值动稳定度为 1247 次/mm，相比掺量为 0% 时提高了 44.33%。这是因为适量的粉煤灰在高温下与沥青发生反应，提高了沥青的粘度和软化点，同时其微集料效应使混合料内部结构更加密实，增强了高温抗车辙能力。但当粉煤灰掺量超过 20% 后，过多的粉煤灰会导致混合料内摩擦阻力减小，沥青胶浆粘结力下降，高温稳定性降低。

4.2. 低温抗裂性

采用低温弯曲试验，在 -10℃ 的试验温度下，测试试件的破坏应变和抗弯拉强度。试验结果见表 6。

Table 6. Low temperature bending test results
表 6. 低温弯曲试验结果

粉煤灰掺量/%	破坏应边/ $\mu\epsilon$	抗弯拉强度/MPa
0	1 921	5.3
10	2 164	5.8
20	2 345	6.3
30	2 473	6.8
40	2 628	7.1

由表 6 可知，粉煤灰的掺入对沥青混合料的低温抗裂性有明显改善。随着粉煤灰掺量增加，试件的

破坏应变逐渐增大，抗弯拉强度有所提高。这是由于粉煤灰球形颗粒起到润滑和缓冲作用，减少了低温下混合料收缩应力集中，提高了柔韧性和抗裂性能。但当掺量为 40%时，提升效果有所减弱，这证明粉煤灰在一定掺量内会对沥青混合料的低温抗裂性能有较大的提升。

4.3. 水稳定性

采用浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验，分别测定试件在浸水 48 小时前后的马歇尔稳定度以及经过 15 次冻融循环后的劈裂强度比。试验结果见表 7。

Table 7. Results of immersion Marshall and freeze-thaw splitting tests
表 7. 浸水马歇尔和冻融劈裂试验结果

粉煤灰掺量/%	残留稳定度/%	冻融劈裂强度比/%
0	80.25	75.83
10	85.64	80.42
20	92.45	86.63
30	94.87	91.24
40	91.18	88.63

由表 7 可知，粉煤灰显著提高了沥青混合料的水稳定性。随着粉煤灰掺量增加，混合料的浸水马歇尔稳定度和冻融劈裂强度比均呈现上升。当粉煤灰掺量在 20%~30%时，水稳定性指标满足规范要求且处于较高水平。这是因为粉煤灰活性成分与沥青酸性成分反应，生成强粘结力物质，同时填充孔隙，降低水分侵入可能性，提升了抗水损害能力。

4.4. 抗滑性能

采用摆式摩擦系数测定仪和构造深度测试法，分别测定混合料试件的摩擦系数和构造深度。试验结果见表 8。

Table 8. Results of anti-skid performance test
表 8. 抗滑性能试验结果

粉煤灰掺量/%	摆式摩擦系数/BPN	构造深度/mm
0	55	0.65
10	53	0.62
20	54	0.63
30	52	0.60
40	50	0.58

由表 8 可知，随着粉煤灰掺量的增加，摩擦系数略有下降，构造深度也有所减小。这是由于粉煤灰填充了部分集料间的空隙，使得混合料表面的宏观构造相对减少。但在粉煤灰掺量为 0%~30%范围内，试验结果均能满足市政道路表面层抗滑性能要求。

5. 结语

本文系统地探究了废弃矿渣 - 粉煤灰在市政道路薄层沥青混合料中的应用效果，通过配合比设计及路用性能试验，为市政道路相关工程提供一些参考意见。结果如下：

(1) 在原材料选择与性能分析的基础上,运用马歇尔设计方法确定了合理的配合比及最佳油石比 4.5%;

(2) 在高温稳定性方面,粉煤灰的掺入对薄层沥青混合料性能产生了显著影响,当粉煤灰掺量为 20% 时动稳定度达到峰值,提升效果明显,这有助于提升道路在高温环境下的抗车辙能力。但过高掺量会对沥青混合料产生不利影响;

(3) 低温抗裂性随粉煤灰掺量增加而改善,体现了其在增强混合料柔韧性与抵抗低温收缩裂缝方面的积极作用,尽管 40%掺量时提升趋缓,但整体仍有增益;

(4) 水稳定性方面,粉煤灰的活性成分与沥青反应及孔隙填充作用,使混合料在浸水和冻融循环下表现更佳,当掺量为 20%~30%区间时能确保良好的水稳定性,有效抵御水损害,延长道路使用寿命;

(5) 粉煤灰的掺入对混合料的抗滑性能有一定影响。但在粉煤灰掺量从 0%增加到 30%的过程中,混合料的摩擦系数和构造深度略有波动,但总体仍满足市政道路表面层的抗滑性能要求。这表明在合理的粉煤灰掺量范围内,不会对混合料的抗滑性能产生明显不利影响。

综上所述,粉煤灰在市政道路薄层沥青混合料中的最佳掺量范围为 20%~30%。本次研究不仅为解决传统薄层沥青混合料的耐久性和稳定性问题提供了有效途径,在推动市政道路建设向绿色可持续发展的进程中迈出了坚实步伐,具有显著的经济、社会与环境效益,有望在未来的市政道路工程中得到广泛应用与进一步优化。

参考文献

- [1] 林宇明. 超粘精罩面(NovaPave)应用于高速公路沥青路面预防性养护的研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [2] 张书华. 高速公路沥青混凝土薄层罩面施工成套技术及地方标准研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [3] 肖劲松. 基于微表处技术的新型聚合物改性抗滑薄层研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [4] 李钊, 唐文洋, 曹勇. 纳米改性基质沥青的耐低温与抗裂性能研究[J]. 粘接, 2025, 52(1): 86-89, 93.
- [5] 罗程, 颜峰, 夏海廷, 等. 钢渣沥青混合料薄层罩面层间剪切性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(12): 4197-4208.
- [6] 沈建成, 任全生, 韩方元, 等. 玄武岩纤维薄层罩面 AC-10 沥青混合料性能研究[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(6): 77-80.
- [7] 孙铭锴. 西北大温差地区 PEG 漂珠相变储能沥青砼控温及路用性能的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- [8] 梁立军. 细集料对沥青混合料性能影响研究[J]. 北方交通, 2008(5): 62-63.
- [9] 彭敏. 粉煤灰的形貌、组成分析及其应用[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湘潭大学, 2004.