

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20220911001

文章编号: 1674-599X(2023)03-0018-08

引用格式: 朱兴龙, 薛艳华, 薛逸阳, 等. 飞灰替代矿粉沥青胶浆及混合料性能研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(3): 18-25.

Citation: ZHU Xinglong, XUE Yanhua, XUE Yiyang, et al. Study on the performance of fly ash instead of mineral powder asphalt slurry and mixture [J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(3): 18-25.

飞灰替代矿粉沥青胶浆及混合料的性能研究

朱兴龙¹, 薛艳华², 薛逸阳², 彭良臣², 葛冬冬²

(1. 深圳市市政工程总公司, 广东 深圳 518000; 2. 长沙理工大学 交通运输学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 将垃圾焚烧后得到的废弃物飞灰用于沥青道路工程中, 可促进资源的合理化利用及绿色交通的发展。为研究飞灰沥青胶浆及混合料的性能, 将飞灰掺加至基质沥青中, 分别制备不同粉胶比、飞灰掺量的沥青胶浆, 研究其流变性能, 并验证混合料的路用性能。试验结果表明: 飞灰能提升沥青胶浆的高温性能, 但对低温性能影响不明显。飞灰显著提升沥青混合料的抗永久变形性能, 但影响其低温抗裂性, 降低水稳定性, 试验结果均满足规范要求。沥青流变性能和混合料路用性能试验验证了飞灰部分替代矿粉的可行性, 建议飞灰替代掺量为 25% ~ 50%。

关键词: 沥青胶浆; 飞灰; 流变性能

中图分类号: U416

文献标志码: A

Study on the performance of fly ash instead of mineral powder asphalt slurry and mixture

ZHU Xinglong¹, XUE Yanhua², XUE Yiyang², PENG Liangchen², GE Dongdong²

(1. Shenzhen Municipal Engineering Corp, Shenzhen 518000, China; 2. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The waste fly ash from waste incineration has been used in asphalt road projects, promoting the utilization of resources and the development of green transportation. In this study, in order to study the performance of fly ash asphalt binder and mixture, the fly ash was added to the asphalt, the asphalt binder with different powder-to-binder ratios (F/A) and fly ash content was prepared to investigate the rheological performance of asphalt binder. Moreover, the road performance of the mixture was verified. The results showed that the high-temperature behavior of asphalt binder can be improved by the fly ash, however, which has no significant effect on the low-temperature rheological properties of asphalt mortar. Furthermore, the permanent deformation resistance of asphalt mixture can be improved. However, the low-temperature crack resistance will be affected. and the water stability will be reduced, the test results still meet the specification requirements. The feasibility of partially replacing of mineral powder by the fly ash is verified the rheological behavior of asphalt and mixture pavement performance tests. The recommended replacement amount of fly ash is about 25% ~ 50% of mineral powder.

Key words: asphalt mortar; fly ash; rheological properties

随着中国交通建设的发展迅猛, 沥青道路因其服役性能优异而被广泛使用在道路建设中。沥青胶浆会影响混合料的路用性能。矿粉和沥青是胶

浆的重要组成部分。其中, 石灰岩和玄武岩矿粉是应用最广泛的道路沥青混合料的填料, 但不同种类的矿粉也会不同程度地影响沥青混合料路用的性

收稿日期: 2022-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(52108398)

作者简介: 朱兴龙(1976—), 男, 深圳市市政工程总公司高级工程师。

能。近年来,矿粉产量逐渐下降,严重影响道路建设的发展。因此,研究其他材料替代矿粉用作沥青混合料的填料具有重大意义^[1]。

城市垃圾在进行焚烧后会产生飞灰和底渣。其中,飞灰属于废弃物,它是垃圾焚烧之后产生的粉末状物质,产量约为残留垃圾总量的20%。飞灰的产量巨大,每天飞灰的产量约为0.66~1.10万吨。飞灰的处理方式主要有密封、水泥固化、熔融和使用Na₂S进行化学固化后再填埋。对飞灰进行填埋不仅会极大地浪费土地资源,还存在泄漏的风险。因此,如何科学合理地处理和利用飞灰是目前面临的重大难题。飞灰与矿粉的物理性质相似,沥青具有良好的黏结性,若将飞灰作为填料应用于沥青混合料的配制中,可使其得到有效利用,促进绿色交通的发展。大量学者针对飞灰替代沥青混合料中的矿粉进行了研究^[2]。有研究表明:掺加10%生活垃圾底渣的沥青混合料的高温抗车辙性能提升最显著,当底渣掺量增至20%时,混合料的劈裂抗拉强度和低温弯曲强度最大^[3]。饶荣等^[4]将飞灰与沥青混合制备沥青胶浆进行试验,发现沥青的黏结性能可有效地稳定飞灰中的有害物质,减小其对环境的污染。吴书君等^[5]研究了不同掺量的飞灰对沥青混合料性能的影响,发现飞灰的成份和不同掺量对沥青混合料性能的影响差异性明显。适量的飞灰替代矿粉的沥青混合料的高温稳定性会有所提高,低温抗裂性降低,但依旧满足路用标准^[6]。

目前,仍缺少掺入飞灰胶浆的沥青料混合料性能的相关研究,所以开展沥青胶浆及混合料在不同粉胶比、飞灰掺量时的研究有重要意义。这将节约飞灰在处理过程中的土地资源和资金,促进废弃物的高效利用及绿色交通的发展。因此,本研究拟进行不同粉胶比、不同飞灰掺量的沥青胶浆的流变性能研究,进行黏度、温度扫描、频率扫描和低温弯曲试验,探究飞灰对沥青胶浆性的影响规律。

1 材料与试验

1.1 试验材料

1.1.1 沥青

本试验选用湖南省长沙市扬子公司生产的70#沥青为基质沥青,其技术指标见表1。基质沥青的测试结果均满足规范^[7]的要求。

表1 基质沥青指标
Table 1 Performance indicators of asphalt

指标	试验结果	规范要求
60℃动力黏度/(Pa·s)	206.5	>180
针入度/(0.1 mm)	68.3	60~80
延度(15℃)/cm	>150	>100
软化点/℃	47.6	>46
溶解度/%	99.8	>99.5

1.1.2 填料

石灰岩矿粉为湖南省云中科技公司生产,其性能参数见表2。飞灰选用山东省潍坊市圣洁环保有限公司生产的飞灰,其外观为白色粉末,比表面积为6.15 m²/g,表观密度为2.234 g/cm³。

表2 矿粉性能指标
Table 2 Performance indicators of mineral powder

指标	试验结果	规范要求
含水量/%	0.3	<1.0
亲水系数	0.83	<1.00
表观密度/(g·cm ⁻³)	2.653	>2.500
比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	1.4	—

1.1.3 集料及配合比设计

选取玄武岩作为沥青混合料集料,其性能指标见表3。混合料级配曲线如图1所示。

表3 玄武岩的性能
Table 3 Properties of basalt

项目	技术要求	试验结果
表观密度/(g·cm ⁻³)	≥2.600	2.726
压碎值/%	≤26.00	17.21
粗集料中扁平 and 细长颗粒含量/%	≤15.00	8.16
二氧化碳含量/%	—	1.77

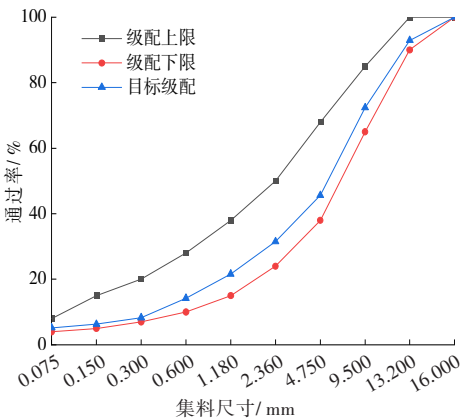


图1 级配曲线

Fig. 1 Gradation curve

1.2 改性沥青的制备

先将基质沥青、飞灰和矿粉加热至 135 ℃,再将一定质量的飞灰和矿粉加入基质沥青中,并采用高速剪切仪对其进行高速剪切。为确保填料能更加均匀地分散在基质沥青中,在 160 ℃ 的温度下,以 2 000 r/min 的剪切速率高速剪切 1 h^[2]。其中,沥青胶浆中粉胶比分别为 0.6、0.8、1.0,飞灰替代矿粉的掺量分别为 0%、25%、50%、75%、100%。

1.3 试验方法

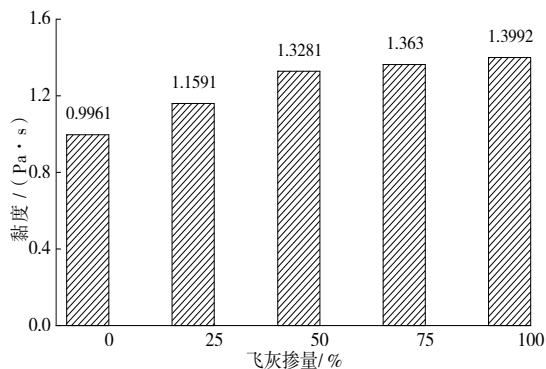
依据美国 SHRP 沥青规范,采用布氏旋转黏度仪和动态剪切流变仪进行黏度、温度扫描和频率扫描试验,研究沥青的流变特性^[8]。黏度试验在 135 ~ 175 ℃ 进行。温度扫描的速率为 10 rad/s,试验温度为 40 ~ 80 ℃。在温度为 60 ℃、角频率为 1 ~ 100 rad/s 时进行频率扫描试验。采用弯曲梁流变仪 (bending beam rheometer, BBR) 测试沥青混合料的低温抗裂性能^[9],试验温度分别为 -6 ℃、-12 ℃、-18 ℃。其中,BBR 试验中的沥青样品均先进行旋转薄膜烘箱老化和压力老化处理,再进行沥青混合料路用性能试验。沥青混合料路用性能试验包括车辙试验、低温弯曲试验和浸水马歇尔试验,均按照规范进行^[10]。为确保试验数据的可靠性,所有试验均进行三组平行试验,取三次试验的平均值作为试验结果。

2 试验结果与分析

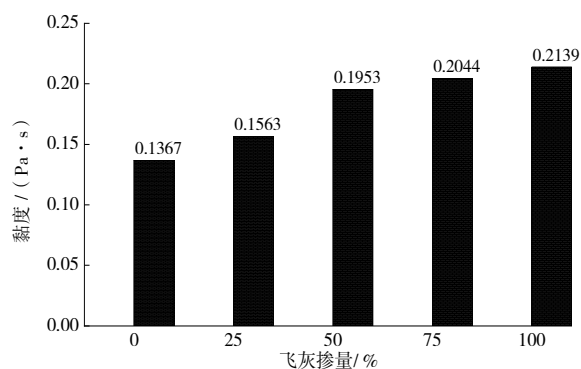
2.1 飞灰沥青胶浆的流变性能

2.1.1 黏度

沥青的黏度表征沥青的流动性能。因实际工程中常用的粉胶比为 0.8,为研究飞灰掺量对沥青黏度的影响,本试验也以 0.8 的粉胶比制备改性沥青进行黏度试验,测试沥青胶浆分别在 135 ℃、175 ℃ 时的黏度,试验结果如图 2 所示。



(a) 135 ℃黏度



(b) 175 ℃黏度

图2 沥青胶浆在不同温度的黏度

Fig. 2 Viscosity

从图 2 可以看出,随着试验温度由 135 ℃ 升至 175 ℃,沥青胶浆的黏度出现明显的下降。当温度为 135 ℃ 时,纯矿粉沥青胶浆的黏度为 0.996 1 Pa·s,当飞灰掺量为 25% 时,飞灰沥青胶浆黏度增至 1.159 1 Pa·s,比纯矿粉沥青胶浆的增加了 16.36%。纯飞灰沥青胶浆在 135 ℃ 时的黏度为 1.399 2 Pa·s,比纯矿粉沥青胶浆的增加了 40.47%。沥青黏度增大会显著增强混合料的高温稳定性。从图 2 还可以看出,沥青胶浆黏度随着飞灰掺量的增大呈先上升后平缓的变化趋势。当飞灰的掺量分别为 25%、50% 时,沥青胶浆的黏度增加最显著;随着飞灰掺量继续增加,对黏度的提升效果逐渐减小。这表明:飞灰对沥青胶浆黏度的提升效果是有限的,少量的飞灰对沥青胶浆的黏度有较大的提升效果,飞灰能改善沥青胶浆的高温性能。

2.1.2 温度扫描

本试验对沥青胶浆进行温度扫描试验,以复数剪切模量作为评价指标^[11]。温度扫描试验结果如图 3 ~ 5 所示。

从图 3 ~ 5 可以看出,沥青胶浆的复数剪切模量随着温度升高呈逐渐降低的趋势,如图 3 所示。当试验温度为 60 ℃、粉胶比为 0.8 时,飞灰的掺量分别为 0%、25%、50%、75%、100% 的沥青胶浆复数剪切模量分别为 8 744、11 256、11 388、15 539 和 17 358 Pa,与基质沥青的复数剪切模量为 3 712 Pa 相比,分别提高了 135.56%、203.23%、206.79%、318.62%、367.62%。当飞灰的掺量由 0% 增至 25%、50% 增至 75% 时,沥青胶浆的复数剪切模量增加较为明显。

飞灰掺量过高会降低沥青胶浆的塑性变形能力,同时会对沥青混合料的水稳定性产生不利影

响^[12]。因此,建议飞灰掺量为25%~50%。

在相同的粉胶比下,随着飞灰替代矿粉掺量的增加,沥青胶浆的复数剪切模量逐渐增加,将矿粉全部替换为飞灰的沥青胶浆的复数剪切模量最大。

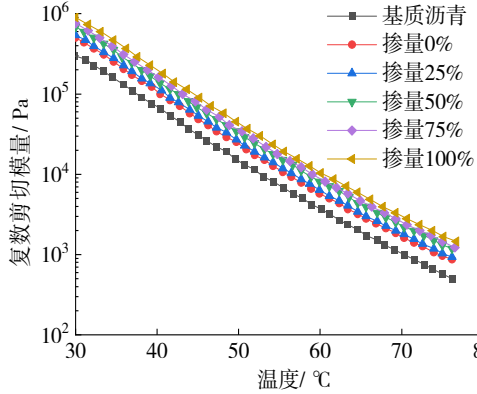


图3 粉胶比为0.6时沥青胶浆的复数剪切模量

Fig. 3 The complex shear modulus of asphalt binder at a water-to-binder ratio of 0.6

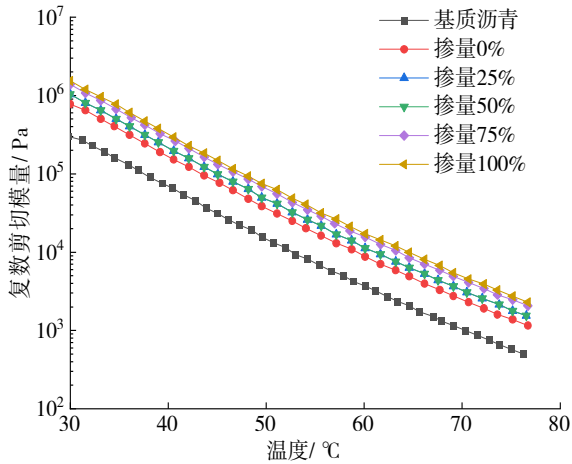


图4 粉胶比为0.8时沥青胶浆的复数剪切模量

Fig. 4 The complex shear modulus of asphalt binder at a water-to-binder ratio of 0.8

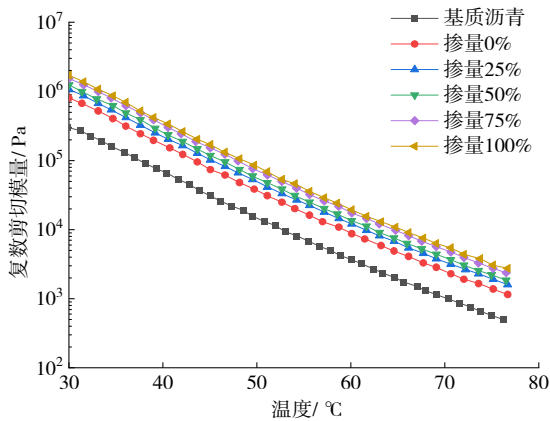


图5 粉胶比为1.0时沥青胶浆的复数剪切模量

Fig. 5 The complex shear modulus of asphalt binder at a water-to-binder ratio of 1.0

从图3~5还可看出,当粉胶比为0.8时沥青胶浆复数剪切模量有明显的上升;当粉胶比增至1.0时,复数剪切模量略有提升,表明:飞灰替代矿粉的粉胶比在0.8~1.0时的沥青胶浆复数剪切模量提升效果最好。

2.1.3 频率扫描

对不同飞灰掺量、粉胶比的沥青胶浆进行频率扫描试验,试验结果如图6~8所示。频率扫描试验结果可以反映沥青对频率的敏感性和黏弹性能。加载频率模拟的是行车速度,该试验采用复数剪切模量反映沥青的高温抗变形能力。

从图6~8可以看出,随着加载频率逐渐加快,沥青胶浆的复数剪切模量逐渐升高。这表明车速越快,沥青路面的弹性响应越强,越少出现车辙变形。相对于基质沥青,掺入了飞灰的矿粉沥青胶浆的复数剪切模量有明显的增加,这是由于矿粉或飞灰的加入使沥青的黏度增加,沥青的高温性能得到了明显的提升。频率扫描试验结果与温度扫描试验结果一致,当粉胶比为0.8~1.0时,沥青胶浆的复数剪切模量增加最为显著。

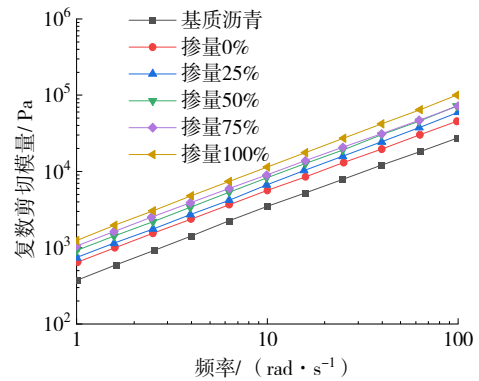


图6 粉胶比为0.6时沥青胶浆的复数剪切模量

Fig. 6 The complex shear modulus of asphalt binder at a

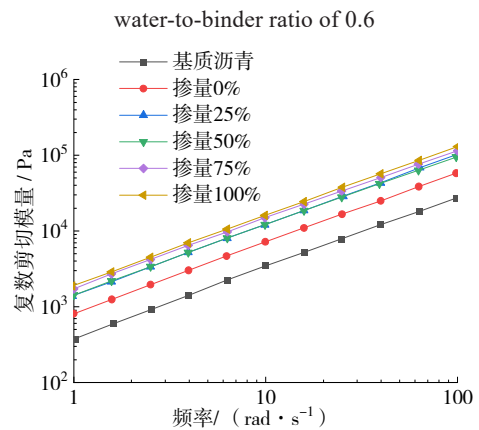


图7 粉胶比为0.8时沥青胶浆的复数剪切模量

Fig. 7 The complex shear modulus of asphalt binder at a water-to-binder ratio of 0.8

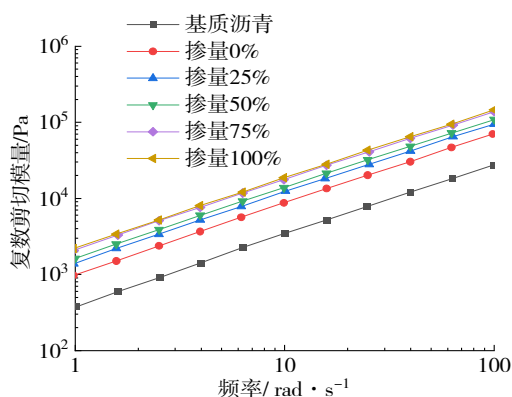


图8 粉胶比为1.0时沥青胶浆的复数剪切模量

Fig. 8 The complex shear modulus of asphalt binder at a water-to-binder ratio of 1.0

从图7还可以看出,当粉胶比为0.8时,飞灰掺量分别为0%、25%、50%、75%、100%的沥青胶浆复数剪切模量分别为7 191.7、12 114、12 267、15 008和16 212 Pa。与掺加100%矿粉的沥青胶浆相比,它们的复数剪切模量依次提高了68.44%、70.57%、108.70%、125.43%。

频率扫描试验结果表明,随着飞灰掺量的增加,沥青胶浆的复数剪切模量逐渐提升,但提升幅度有明显的不同。当飞灰掺量从0%增加到25%时,沥青胶浆复数剪切模量增长的幅度最大。考虑到飞灰的掺量不宜过高,综合考虑温度和频率的结果,飞灰掺量设为25%~50%较为合适。

2.1.4 低温弯曲

低温开裂是沥青路面常见的病害类型之一。路面表层的裂缝会使水分更容易进入基层结构,在车辆荷载的作用下,将加速路面结构的破坏;降低路面的服役性能,缩短路面的使用寿命。对沥青胶浆进行低温弯曲流变试验,探究其低温性能是十分必要的。该试验温度分别设为-6℃、-12℃和-18℃,沥青胶浆的低温流变性能分别如图9~10所示,其性能指标应满足《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)^[10]中劲度模量小于300 MPa,蠕变速率大于0.3的要求。

从图9~10可以看出,随着粉胶比的增加,沥青胶浆劲度模量逐渐上升,蠕变速率有所下降,表明沥青胶浆的低温抗裂性有所降低。从图9还可以看出,当试验温度分别为-6℃、-12℃时,沥青胶浆的劲度模量低于300 MPa;当试验温度为-18℃时,劲度模量增至400 MPa,表明沥青胶浆在温度为-12℃时劲

度模量可以满足规范^[10]小于300 MPa的要求。从图10还可以看出,当试验温度分别为-6℃、-12℃、-18℃时,沥青胶浆的蠕变速率均大于0.3,表明飞灰沥青胶浆有良好的应力松弛能力。蠕变速率的增加主要是由于飞灰具有较大的比面积和较大孔隙率等特点,其与沥青混合后,轻质组分和油分相融合,导致沥青质的相对质量分数增加,在低温环境下更加脆硬^[13]。但随着飞灰掺量的逐渐增加,劲度模量和蠕变速率变化不明显,表明填料类型对沥青胶浆的影响不显著。当粉胶比为1.0时,沥青胶浆的低温性能较差。

—■— 粉胶比为0.6, -6℃ —●— 粉胶比为0.6, -12℃ —▲— 粉胶比为0.6, -18℃
—▼— 粉胶比为0.8, -6℃ —◆— 粉胶比为0.8, -12℃ —◆— 粉胶比为0.8, -18℃
—◆— 粉胶比为1.0, -6℃ —◆— 粉胶比为1.0, -12℃ —◆— 粉胶比为1.0, -18℃

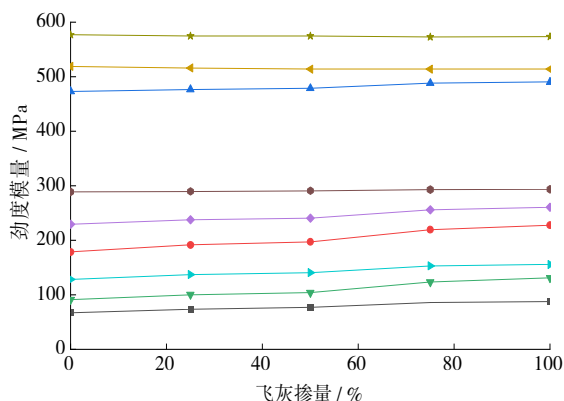


图9 沥青胶浆的劲度模量

Fig. 9 The stiffness modulus of asphalt binder

—■— 粉胶比为0.6, -6℃ —●— 粉胶比为0.6, -12℃ —▲— 粉胶比为0.6, -18℃
—▼— 粉胶比为0.8, -6℃ —◆— 粉胶比为0.8, -12℃ —◆— 粉胶比为0.8, -18℃
—◆— 粉胶比为1.0, -6℃ —◆— 粉胶比为1.0, -12℃ —◆— 粉胶比为1.0, -18℃

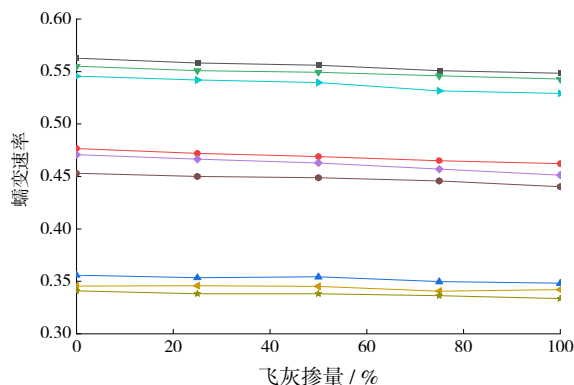


图10 沥青胶浆的蠕变速率

Fig. 10 The creep rate of asphalt binder

2.2 飞灰沥青混合料的路用性能

对飞灰掺量分别为0%、25%、50%、75%和100%的沥青混合料开展路用性能试验。通过马歇尔试验,确定在这些飞灰掺量下的沥青混合料的最佳油石比依次为4.31%、4.35%、4.37%、4.37%、4.38%。

通过黏温曲线,确定沥青混合料的拌合温度范围为143~147℃,压实温度范围为132~137℃。

2.2.1 车辙试验

车辙试验结果如图11所示。从图11可以看出,飞灰掺量分别为0%、25%、50%、75%、100%的沥青混合料的动稳定度分别是1 021、1 054、1 098、1 167和1 263次/mm。与完全使用矿粉的沥青混合料相比,掺入飞灰的沥青混合料的动稳定度有明显的增加,而车辙深度也有所降低。这表明:飞灰能够有效地改善沥青混合料的抗车辙变形能力。飞灰比矿粉的比表面积大、粒度小,随着飞灰替代矿粉掺量的增加,沥青胶浆的总比表面积增大,增大了结构沥青膜厚度,减小了沥青混合料的孔隙率,增加了密实度,承受荷载时矿料间不易产生相对滑动。同时,飞灰可以吸附沥青中的油分,使得沥青胶浆变得更黏稠,增强沥青胶结料和石料之间的黏附性,减小自由沥青的润滑作用,增强混合料抵抗剪切变形能力^[14]。

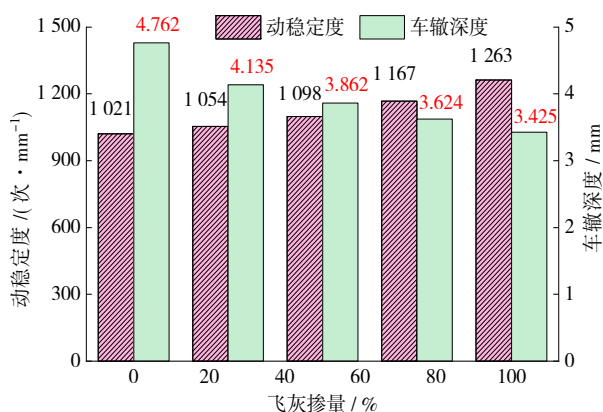


图11 车辙试验结果

Fig. 11 Results of rutting test

车辙试验与流变性能试验的结论基本一致,沥青胶浆的高温性能在飞灰的作用下得到了明显提高,大幅提高了沥青混合料抵抗永久变形的能力。同时,飞灰的有效利用可以促进废弃物循环利用,促进绿色交通发展。

2.2.2 低温弯曲试验

道路裂缝会加速路面破坏,路表水会不断进入路面基层,甚至会导致路基土流失,引起路面坍塌,影响行车舒适性和道路安全。因此,研究路面的低温抗裂性至关重要。在-10℃下进行小梁低温弯曲试验,结果如图12所示。

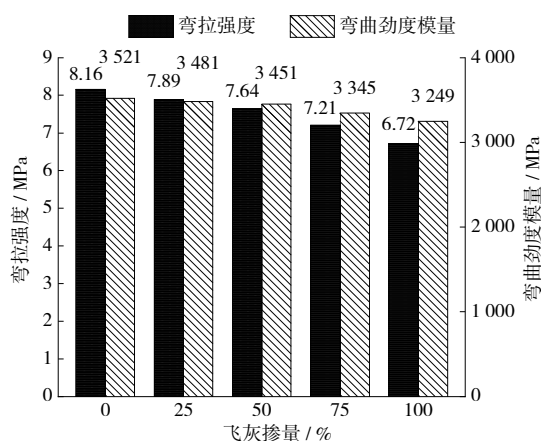


图12 低温弯曲试验结果

Fig. 12 Results of low-temperature bending test

从图12可以看出,使用飞灰替代矿粉后,沥青混合料的弯拉强度和弯曲劲度模量均有所降低。与完全使用矿粉的沥青混合料相比,飞灰掺量分别为25%、50%、75%、100%的沥青混合料弯拉强度分别降低了3.30%、6.37%、11.64%、17.64%,弯曲劲度模量分别降低了1.14%、2.00%、5.00%、7.72%。相对于矿粉沥青混合料,掺飞灰沥青混合料的弯拉强度明显降低,其最大降低幅度为1.46 MPa。这表明飞灰替代矿粉后,沥青混合料的低温性能有明显的降低^[15]。飞灰的掺入导致沥青中油分减少,使得自由沥青中的石蜡质量分数上升,在低温环境下,石蜡会逐渐向沥青表面聚集,提高沥青表面的石蜡含量,使其表面能降低,黏附性下降,低温脆性增大。

2.2.3 水稳定性试验

研究表明70%的沥青道路早期破坏是水损害引起的。水会导致沥青与集料的黏附性降低,在重复荷载作用下沥青路面会发生松散,产生坑洞,影响行车舒适性和行车安全。水损害已经成为影响路面使用性能和耐久性的主要原因,对改性沥青进行水稳定性试验研究至关重要,掺入飞灰的沥青混合料的浸水马歇尔试验结果如图13~14所示。

从图13~14可以看出,掺入飞灰的沥青混合料的动稳定度与残留稳定度均显著降低。沥青的残留稳定虽然有所降低,但是仍能满足规范的要求。因此,沥青混合料中掺入飞灰是可行性的。但飞灰对沥青混合料的水稳定性有不利影响,这主要因为飞灰比表面积大,微孔多,吸附沥青中轻质油分的能力强于矿粉的。当飞灰掺量过多时,沥青表面的固体石蜡含量较高,降低了沥青表面能,不利于沥青和填料间的

黏附。且飞灰内部含有各种盐分,这些盐分能与水反应产生内部膨胀力,不利于沥青混合料的水稳定性^[16-18]。

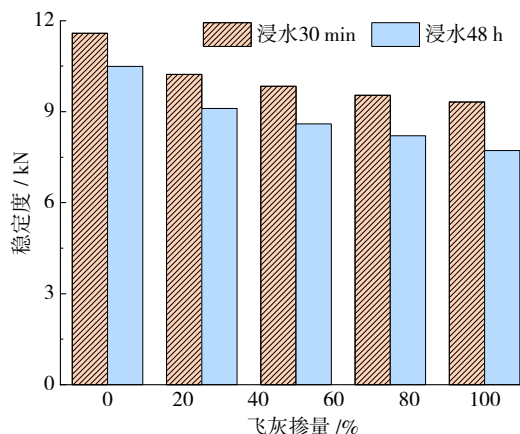


图13 浸水马歇尔试验结果

Fig. 13 Results of immersion the Marshall test

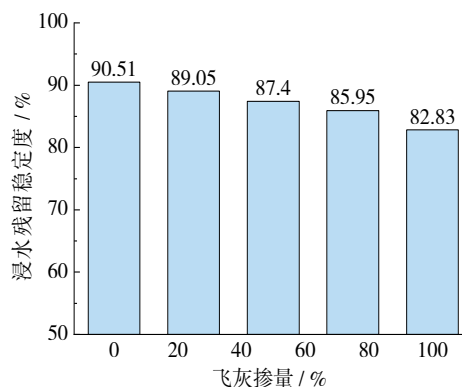


图14 浸水残留稳定度

Fig. 14 Residual stability after immersion

3 结论

通过对不同掺量的飞灰沥青胶浆和沥青混合料进行试验,得出结论:

1) 飞灰可以改善沥青胶浆的高温稳定性。当飞灰替代矿粉掺量为25%~50%时,沥青胶浆的复数剪切模量增加最为明显。随着飞灰掺量的增加,沥青胶浆的劲度模量和蠕变速率变化不明显,表明填料类型对沥青胶浆的影响不显著。

2) 掺入飞灰能够提升沥青混合料的路面性能,增强其抗永久变形能力。掺入飞灰的沥青混合料弯拉强度明显降低,其最大降低幅度为1.46 MPa,沥青混合料的低温性能明显降低。由于飞灰组成成分的影响,导致沥青混合料的水稳定性也有所降低,但仍可满足规范要求,试验结果证实了飞灰替

代矿粉的可行性。

3) 考虑沥青胶浆与混合料的性能,推荐飞灰掺量为25%~50%。

参考文献(References):

- [1] 王家庆, 吴健生, 黄凯健等. 生态混凝土绿色护坡的植生性与耐久性[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文): (2021-11-05) [2022-06-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20211105.1043.002.html>.
WANG Jiaqing, WU Jiansheng, HUANG Kaijian, et al. Planting performance and durability of eco-concrete for slope protection [J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering: (2021-11-05)[2022-06-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20211105.1043.002.html>.
- [2] 颜可珍, 郑凯高, 胡迎斌. 城市生活垃圾焚烧飞灰在沥青胶浆中的应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(10): 2509-2517.
YAN Kezhen, ZHENG Kaigao, HU Yingbin. Application of municipal solid waste incinerator ash in asphalt mortar [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(10): 2509-2517.
- [3] 魏婷婷, 顾坤, 李文凯. 城市生活垃圾焚烧底渣沥青混合料路用性能研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(2): 61-69.
WEI Tingting, GU Shen, LI Wenkai. Study on road performance of asphalt mixture with municipal solid waste incineration bottom slag [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2022, 19(2): 61-69.
- [4] 饶荣, 罗超, 刘青. 生活垃圾焚烧飞灰无害化及资源化研究进展[J]. 有色冶金设计与研究, 2018, 39(5): 29-34, 38.
RAO Rong, LUO Chao, LIU Qing. Research progress on harmlessness and resources of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash [J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2018, 39(5): 29-34, 38.
- [5] 吴书君, 唐军, 吴艳玲. 飞灰替代矿粉对沥青胶浆性能的影响[J]. 山东交通学院学报, 2022, 30(3): 115-122.
WU Shujun, TANG Jun, WU Yanling. The influence of fly ash replacement of mineral powder on performance of asphalt mortar [J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2022, 30(3): 115-122.
- [6] 赵倩倩. 城市生活垃圾焚烧飞灰在资源化利用方面的综述[J]. 广东化工, 2020, 47(9): 139-140.

- ZHAO Qianqian. The overview of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash in resources utilization[J]. Guangdong Chemical Industry, 2020, 47(9): 139-140.
- [7] 邓亚军, 琚子豪, 李园莉, 等. 多聚磷酸改性不同种类生物沥青性能研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(2): 115-124.
- DENG Yajun, JU Zihao, LI Yuanbo, et al. Study on the properties of PPA modified different kinds of bio-asphalt [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2023, 20(2): 115-124.
- [8] 李雪连, 郭甲林, 崔之靖, 等. 再生SBS改性沥青的蠕变与松弛性能研究[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(2): 7-12, 53.
- LI Xuelian, GUO Jialin, CUI Zhijing, et al. Creep and relaxation performance of reclaimed asphalt using SBS modified [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(2): 7-12, 53.
- [9] 交通运输部公路科学研究所. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011 [J]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- Research Institute of Highway Ministry of Transport. Standard test methods of bitumen and bituminous mixture for Highway Engineering: JTG E20—2011 [J]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [10] 李雪连, 郭甲林, 崔之靖, 等. 再生SBS改性沥青的蠕变与松弛性能研究[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(2): 7-12, 53.
- LI Xuelian, GUO Jialin, CUI Zhijing, et al. Creep and relaxation performance of reclaimed asphalt using SBS modified [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(2): 7-12, 53.
- [11] 陈毅国. 焚烧飞灰在沥青路面中的应用[J]. 交通世界, 2017(9): 129-131.
- CHEN Yiguo. Application of incineration fly ash in asphalt pavement[J]. TranspoWorld, 2017(9): 129-131.
- [12] 逮相科, 秦世伟, 卢良志. 飞灰固结体在沥青混合料中应用研究[J]. 矿冶, 2018, 27(1): 73-78.
- LU Xiangke, QIN Shiwei, LU Liangzhi. Study on the application of fly ash and new consolidation agent in asphalt mixture [J]. Mining and Metallurgy, 2018, 27(1): 73-78.
- [13] 李菁若, 谭巍, 张东长, 等. 城市生活垃圾焚烧飞灰/沥青胶浆的性能研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(11): 23-30.
- LI Jingruo, TAN Wei, ZHANG Dongchang, et al. Study on performance of municipal solid waste incinerator fly ash/asphalt mastic [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(11): 23-30.
- [14] 严建华, 马增益, 彭雯, 等. 沥青固化城市生活垃圾焚烧飞灰的实验研究[J]. 环境科学学报, 2004, 24(4): 730-733.
- YAN Jianhua, MA Zengyi, PENG Wen, et al. Experimental study on solidification of MSW incinerator fly ash by mixing with asphalt [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004, 24(4): 730-733.
- [15] 李达, 孔恒, 郭飞, 等. 垃圾焚烧水洗飞灰沥青混合料重金属浸出机理研究[J]. 公路交通科技, 2018, 35(8): 13-18.
- LI Da, KONG Heng, GUO Fei, et al. Study on extraction mechanism of heavy metal in waste incineration washed fly ash asphalt mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(8): 13-18.
- [17] 吴水辉, 张登科, 王辉. 废胶粉复合改性沥青制备与性能研究[J]. 公路与汽运, 2023(1): 55-59.
- WU Shuihui, ZHANG Dengke, WANG Hui. Study on preparation and properties of waste rubber powder composite modified asphalt [J]. Highways & Automotive Applications, 2023(1): 55-59.
- [18] 徐霏, 吴强, 李婵婵, 等. 盐蚀作用下沥青混合料路用性能劣化规律研究[J]. 公路交通技术, 2022, 38(6): 1-6.
- XU Pei, WU Qiang, LI Chanchan, et al. Research on the pavement performance deterioration law of asphalt mixture in salt erosion [J]. Technology of Highway and Transport, 2022, 38(6): 1-6.

(责任编辑:欧兆虎;校对:李脉;英文编辑:陈璐)