

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202208152024101979

文章编号:1674-599X(2024)05-0053-09

引用格式:孙志林,彭勇,朱志航.赤泥填料对排水沥青混合料路用性能的影响[J].交通科学与工程,2024,40(5):53-61.

Citation: SUN Zhilin, PENG Yong, ZHU Zhihang. Influence of red mud filler on road performance of drainage asphalt mixture[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40(5): 53-61.

赤泥填料对排水沥青混合料路用性能的影响

孙志林¹, 彭勇¹, 朱志航²

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114;2.江苏东交智控科技集团股份有限公司,
江苏 南京 210023)

摘 要:为探究赤泥填料对排水沥青混合料路用性能的影响,首先选择两种国产高黏改性剂PT-HVA和AR-HVA制备得到高黏改性沥青,并将成品苯乙烯-丁二烯-苯乙烯(styrene-butadiene-styrene, SBS)改性沥青作为对照组,对三种改性沥青进行各项沥青性能试验。结果表明:两种改性剂的最佳掺量均为15%。接着以三种改性沥青为胶结料配制三种排水性沥青混合料(填料为赤泥和矿粉),并进行各项路用性能试验。结果表明:由赤泥制备的混合料的路用性能良好,其中AR-HVA高黏改性沥青+赤泥制备的混合料性能最优,动稳定度达11 053次/mm,残留稳定度为91.46%,冻融劈裂比为89.60%,飞散损失为5.20%,老化系数为24.60%。同时,由赤泥制备而成的混合料的弯拉强度和弯拉应变比由矿粉制备的混合料的小,这表明赤泥虽能有效地提高混合料的高温性能、水稳性能、抗松散性能和抗老化性能,但会降低混合料的低温性能。

关键词:高黏改性沥青;排水沥青混合料;配合比设计;赤泥;路用性能

中图分类号:U414

文献标志码:A

Influence of red mud filler on road performance of drainage asphalt mixture

SUN Zhilin¹, PENG Yong¹, ZHU Zhihang²

(1.School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;2.Jiangsu Dongjiao Intelligent Control Technology Group Co., Ltd., Nanjing 210023, China)

Abstract: To explore the influence of red mud filler on the road performance of drainage asphalt mixture, this study first selected two domestic high-viscosity modifiers PT-HVA and AR-HVA to prepare high-viscosity modified asphalt. The finished styrene-butadiene-styrene (SBS) modified asphalt was taken as the control, and various asphalt performance tests were carried out on the three kinds of modified asphalt. The results indicate that the best mixing amount of the two modifiers is 15%. Then, three kinds of drainage asphalt mixtures were prepared with the three kinds of modified asphalt as cementing materials, in which the fillers were red mud and mineral powder. The road performance tests of the three kinds of drainage asphalt mixtures were carried out. The results show that the road performance of the mixtures prepared with red mud is good, among which the mixture prepared from AR-HVA high-viscosity modified asphalt and red mud has the best performance with dynamic stability of 11 053 times/mm, residual stability of 91.46%, a freeze-thaw splitting ratio of 89.60%, scattering loss of 5.20%, and an aging coefficient of 24.60%. The flexural tensile strength and strain of the

收稿日期:2022-08-15

通信作者:孙志林(1979—),男,副教授,主要从事路面新材料研发等方面的研究工作。E-mail:sunzhilin1979@csust.edu.cn

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

mixtures prepared with red mud are smaller than those of the mixtures prepared with mineral powder. This shows that although red mud can effectively improve the high-temperature performance, water stability, anti-loosening performance, and anti-aging performance of the mixtures, it degrades their low-temperature performance.

Key words: high-viscosity modified asphalt; drainage asphalt mixture; mix proportion design; red mud; road performance

我国公路、铁路等基础设施建设的快速发展导致大量不可再生资源被开采。其中,填料作为沥青混合料中不可或缺的组成部分,尽管其占比不高,却对沥青混合料的整体性能具有显著的影响^[1-5]。目前,沥青混合料中广泛采用的填料主要是天然石灰石矿粉。然而,随着中国的水泥行业和建筑业的发展,石灰石矿料作为一种自然资源正面临枯竭的危险^[6-7]。此外,石灰石矿粉的生产过程伴随着大量粉尘排放,对环境造成了严重污染,使得众多石灰岩矿粉生产企业关闭整改,进而加剧了市场上矿粉供应的紧张局面,导致其价格持续攀升。鉴于此,迫切需要探索并推广更多、更优的填料替代品,以缓解对传统石灰石填料的依赖。

目前,通过固体废弃物的回收与再利用来开发沥青混合料中的填料,正逐步成为研究人员共同关注的焦点。诸多研究表明,多种废弃材料,如脱硫灰、钢渣、再生红砖粉、煤矸石粉、粉煤灰以及废旧石灰等,已展现出作为传统石灰石矿粉替代品的巨大潜力,有效提升了资源循环利用率并减少了环境污染^[8-15]。我国作为生产氧化铝的主要国家,氧化铝生产过程中所产生的大量废弃物——赤泥长期以来未能得到妥善处理 and 有效利用,不仅对环境造成了严重污染,也违背了资源循环再利用的可持续发展理念。

近年来,已有研究表明赤泥能作为填料在沥青混合料中使用,其有望成为一种环保且经济的矿粉替代品,这一发现不仅为解决赤泥处理问题提供了新思路,也为沥青混合料的性能优化和成本降低开辟了新途径。CHOUDHARY等^[16]研究了7种固体废弃物代替普通硅酸盐水泥作为密级配沥青混合料中填料的可行性,结果表明:用赤泥作填料的沥青混合料具有更加优良的刚度和抗裂性。包惠明等^[17]通过在基质沥青中掺加赤泥来制备改性沥青,研究发现:随着赤泥掺量的逐步提升,赤泥改性沥青的黏度会相应增加。通过扫描电镜试验可以发现,当赤泥掺量为沥青质量的13%时,共混体系呈

现出理想分布状态。ZHANG等^[18]探索了用赤泥作为多孔沥青路面填料的可行性,并将石灰岩矿粉作为对照组。通过车辙试验和肯塔堡飞散试验发现:赤泥多孔沥青混合料的抗车辙和抗飞散性能都要比矿粉多孔沥青混合料的好。ZHANG等^[19]为了进一步提升赤泥改性沥青混合料的性能,创新性地引入了熟石灰和白泥作为改性剂,结果表明:掺入熟石灰和白泥均能提高赤泥沥青砂浆的抗低温开裂性能。此外,在赤泥改性沥青中掺入白泥,不仅能提升集料与砂浆之间的短期抗水损害性能,还显著增强了其长期抗水损害性能以及抗疲劳性能。

近年来,赤泥资源的研究与利用虽已初具规模,但仍缺乏系统性的深入研究。赤泥能否全面取代矿粉作为沥青混合料填料,以及其对沥青路面综合性能的具体影响尚待明确。排水沥青路面作为一种新型的路面结构,因其能有效缓解城市内涝、减轻热岛效应并降低雨天交通事故率,已在多国得到广泛应用。然而,其高空隙率导致的车辙、飞散及水损害问题频发,成为制约其推广的关键因素。基于此,本文深入开展了赤泥对排水沥青混合料路用性能影响的专项研究,旨在通过科学试验与数据分析,全面评估赤泥在排水路面中的应用潜力与可行性。本研究不仅为赤泥在道路工程中的创新应用提供了理论依据与实践指导,更为解决排水路面现存问题、推动道路材料发展进步开辟了新路径。

1 原材料及性质

本文共选用三种沥青制备排水沥青混合料,分别为两种高黏改性沥青以及成品SBS改性沥青,高黏改性沥青的制备采用了基质沥青作为基础材料,并分别添加了PT-HVA高黏改性剂(简称A高黏剂)和AR-HVA高黏改性剂(简称B高黏剂),并通过对沥青进行高低温性能、感温性能、抗老化性能、流变性能、黏韧性试验得出两种改性剂的最佳掺量均为15%,沥青技术指标如表1所示。本文选用的粗

集料和细集料均为玄武岩碎石,填料为赤泥(拜耳法纤维作为一种外加稳定剂多用于开级配混合料中,可以起到抑制沥青流淌、加筋、增黏的作用,赤泥)和矿粉,其技术指标及成分见表 2~6。

表 1 沥青技术指标

Table 1 Technical indicators of asphalt

沥青	针入度(25 ℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	软化点/℃	5 ℃延度/cm	60 ℃动力黏度/(Pa·s)	弹性恢复率/%	黏韧性/(N·m)	韧性/(N·m)	沥青旋转薄膜加热试验后残留物	
								针入度比/%	延度/cm
A 高黏沥青	45.8	84.3	50.1	63 662.4	94.2	31.2	21.9	75	21.4
B 高黏沥青	45.3	94.6	60.5	238 866.8	98.1	42.5	30.6	83	28.3
SBS 改性沥青	52.3	75.1	32.6	11 817.6	93.2	20.6	12.7	70	16.8

表 2 粗集料技术指标

Table 2 Technical indicators of coarse aggregate

项目	表观相对密度			吸水率/%			压碎值/%	洛杉矶磨耗损失/%	水洗法直径<0.075 mm 颗粒质量分数/%	针片状颗粒质量分数/%
	粒径 9.50 ~ 13.20 mm	粒径 4.75 ~ <9.50 mm	粒径 2.36 ~ <4.75 mm	粒径 9.50 ~ 13.20 mm	粒径 4.75 ~ <9.50 mm	粒径 2.36 ~ <4.75 mm				
检测结果	2.796	2.835	2.925	0.47	0.83	1.03	12.1	13.8	0.2	4.8
技术指标	≥2.600			≤2.00			≤26.0	≤28.0	≤1.0	≤10.0

表 3 细集料技术指标

Table 3 Technical indicators of fine aggregate

项目	表观相对密度					砂当量/%	粒径小于 0.075 mm 颗粒的质量分数/%
	粒径 1.18 ~ 2.36 mm	粒径 0.60 ~ <1.18 mm	粒径 0.30 ~ <0.60 mm	粒径 0.15 ~ <0.30 mm	粒径 0.075 ~ <0.150 mm		
检测结果	2.654	2.649	2.645	2.734	2.761	68	0.4
技术指标	≥2.500					≥60	≤3.0

表 4 拜耳法赤泥成分

Table 4 Bayer red mud ingredients

项目	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	TiO ₂
各成分质量分数/%	3 ~ 20	2 ~ 8	10 ~ 20	30 ~ 60	2 ~ 10	微量 ~ 10

表 5 赤泥技术指标

Table 5 Technical indicators of red mud

项目	表观密度/(t·m ⁻³)	pH	含水量/%	塑性指数/%	对应粒度范围所占比例/%			外观
					<0.6 mm	<0.15 mm	<0.075 mm	
检测结果	2.82	10.2	40.73	6.9	100.0	98.6	91.3	片状颗粒

表 6 矿粉技术指标

Table 6 Technical indicators of mineral powder

项目	表观密度/(t·m ⁻³)	亲水系数	含水量/%	塑性指数/%	对应粒度范围所占比例/%			外观
					<0.6 mm	<0.15 mm	<0.075 mm	
检测结果	2.638	0.8	0.3	2.9	100.0	94.5	87.3	无团粒结块
技术指标	≥2.500	<1.0	≤1.0	<4.0	100.0	90.0 ~ 100.0	75.0 ~ 100.0	无团粒结块

从而达到提升排水路面抗飞散能力的目的。由于排水沥青混合料的拌合温度达到了180~190℃,纤维要想发挥出本身的作用,则必须保证其在250℃

的温度下不变质、不发脆。本文选取聚酯纤维,掺量为混合料总量的0.3%,纤维技术指标见表7。

表7 纤维技术指标

Table 7 Technical indicators of fiber

项目	外观	灰分含量/%	pH	含水率/%	吸油率
检测结果	白色絮状	17.8	8.2	3.4	5.5倍
技术指标		18.0±5.0	7.5±1.0	≤5.0	不小于纤维质量的5.0倍
试验方法	观看	高温590~600℃燃烧后测定残留物	水溶液用pH试纸	烘箱烘2h后冷却称量(温度设置为105℃)	经煤油浸泡后放置于试样筛上,经振动敲击后进行称量

2 混合料配合比设计

2.1 集料级配确定

本文将目标空隙率选定为20%,级配类型选定为PA-13级配。以往国内外的实践经验表明,对于

PA-13排水沥青混合料,可通过调整2.36mm筛孔的通过率来获得预期的目标空隙率。因此本文以2.36mm筛孔通过率的级配中值为基准,在级配中值上下浮动3%的范围内,选定了3组初选级配,级配如表8所示。

表8 初选级配

Table 8 Primary grading

类别	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%									
	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配1	100.0	97.0	70.2	28.5	18.0	15.0	12.0	10.0	7.0	4.0
级配2	100.0	95.0	55.0	20.0	15.0	12.0	10.0	8.5	6.5	4.5
级配3	100.0	96.0	53.0	25.0	12.0	11.0	9.5	7.5	5.8	3.8
设计级配范围	100.0	90.0~<100.0	40.0~<71.0	10.0~<30.0	9.0~<20.0	7.0~<17.0	6.0~<14.0	5.0~<12.0	4.0~<9.0	3.0~<6.0

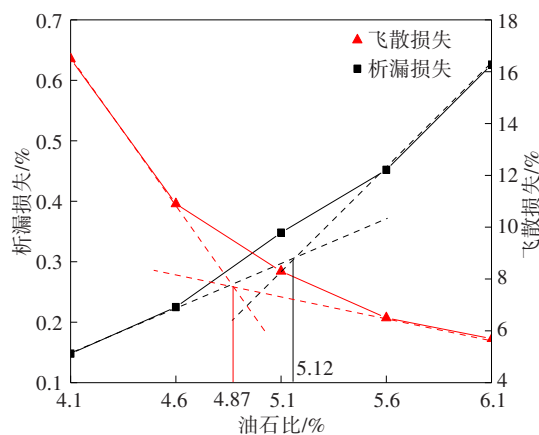
级配3经过马歇尔试验得出的排水沥青混合料空隙率接近20%,满足预设目标,且各项马歇尔指标都符合技术要求,因此确定级配3为最优级配。

2.2 最佳油石比

排水沥青混合料的最佳油石比是通过飞散试验和析漏试验确定的。本文以表8中级配3为设计级配,分别设计了油石比为4.1%、4.6%、5.1%、5.6%、6.1%的5组样本进行飞散试验和析漏试验,试验结果如图1所示。

由图1可看出,A高黏改性沥青混合料的油石比为4.87%~5.12%,B高黏改性沥青混合料的油石比为4.97%~5.28%,SBS改性沥青混合料的油石比为4.82%~5.10%,三种改性沥青混合料的油石比均在4.80%~5.30%之间。为了更加直观地对比三种

沥青混合料路用性能之间的差异,本文选择统一的油石比5.10%对三种沥青混合料进行分析。



(a) A高黏改性沥青混合料

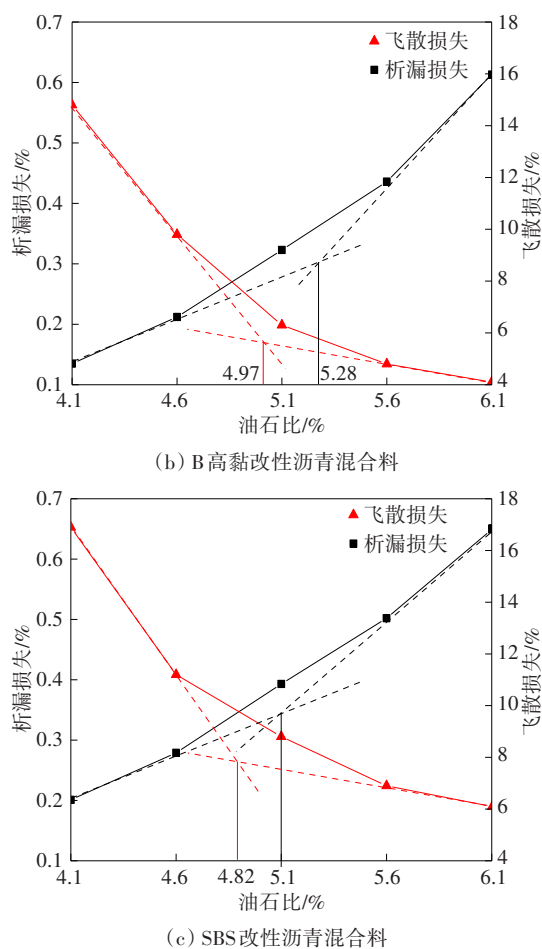


图1 混合料飞散和析漏损失

Fig. 1 Flying and run-off losses of mixture

3 路用性能研究

为深入探究赤泥作为填料对排水沥青混合料路用性能的具体影响,本文对比分析了传统矿粉填料沥青混合料与赤泥填料沥青混合料路用性能的优劣。选用级配3作为设计级配,并统一采用5.10%的油石比,以确保试验结果的客观性。随后,针对三种不同的改性沥青混合料,展开了高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性、抗松散性能以及抗老化性能等多维度的路用性能试验。这一系列试验的开展,旨在全面揭示赤泥对排水沥青混合料路用性能的影响。

3.1 高温性能

为探究三种不同的改性沥青混合料的高温性能,本文采用车辙试验的方法,并将动稳定度作为评价指标(要求排水沥青混合料的动稳定度不小于5 000次/mm)。试验结果如图2所示。

由图2可知,无论A高黏改性沥青混合料、B高

黏改性沥青混合料、SBS改性沥青混合料的填料是矿粉还是赤泥,从车辙试验的结果来看,都是B高黏改性沥青混合料的动稳定度最大,A高黏改性沥青混合料动稳定度次之,SBS改性沥青混合料的动稳定度最小,说明B高黏改性沥青的排水沥青混合料的抗车辙损害能力最强。这可能是由于B高黏改性沥青的黏度最高,而较高的黏度可以增强沥青混合料颗粒间的黏聚力,从而增强了混合料的高温抗变形的能力。

当采用赤泥作为填料时,相较于传统的矿粉填料,试验中三种沥青混合料的动稳定度均出现不同程度的提升。其中B高黏改性沥青混合料的动稳定度提升幅度最大,因此赤泥作为填料能改善沥青混合料的高温性能。其原因主要是:赤泥比表面积大且具有多孔结构,会对沥青产生很强的吸附锚固作用,从而大大提升了沥青与集料之间的黏聚力。且赤泥中的活性金属氧化物 Al_2O_3 会与沥青酸以及酸酐发生反应并形成稳固的化学键。多种因素的综合作用使得赤泥作为填料的排水沥青混合料有更好的高温抗车辙性能。

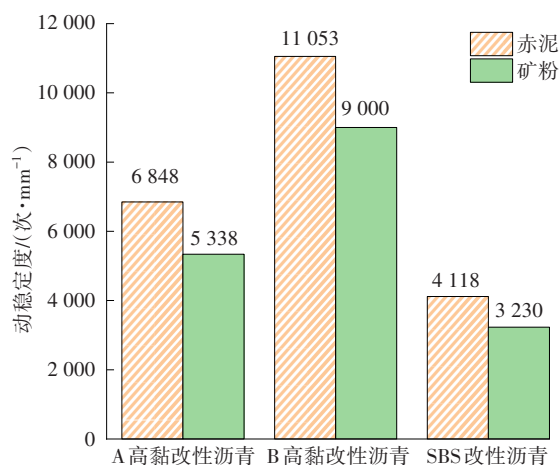


图2 动稳定度

Fig. 2 Dynamic stability

3.2 低温性能

排水沥青路面具有空隙率大的特性,因此其相较于普通密集配路面更容易受到环境温度变化的影响。因此低温性能是确保路面稳定和耐久的关键因素,对排水路面的重要性不言而喻。本文采用低温弯曲试验探究沥青混合料的低温性能,其关键指标为弯拉强度和弯拉应变,用以全面评估沥青混合料的低温性能。试验结果如图3~4所示。

由图3~4可知,B高黏改性沥青混合料的弯拉强度、弯拉应变均最大,说明其低温抗裂性能最好。

矿粉作为填料的沥青混合料的低温性能略微比赤泥作为填料的沥青混合料的好,说明赤泥会降低排水沥青混合料的低温抗裂性能,这也反映出多空隙、大比表面积类无机填料在应用中普遍面临的一个挑战,即可能对混合料的低温性能产生不利影响。

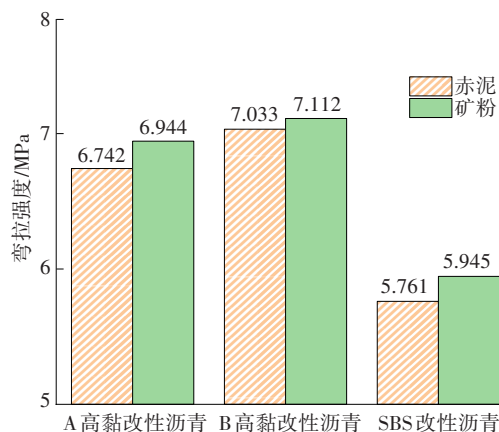


图3 弯拉强度

Fig. 3 Flexural tensile strength

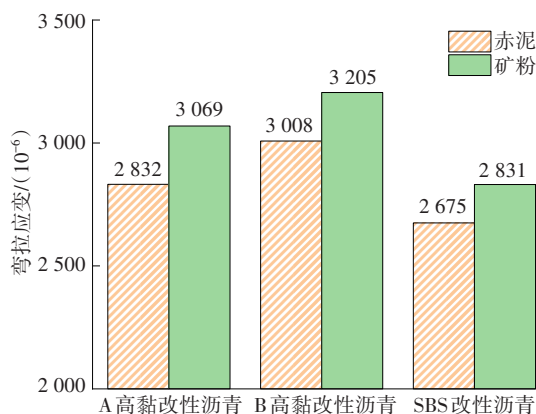


图4 弯拉应变

Fig. 4 Flexural tensile strain

3.3 水稳定性

3.3.1 浸水马歇尔试验

本文采用浸水马歇尔试验测定混合料的残留稳定度,以此评价其水稳定性能。试验结果如图5所示。

由图5可知,三种混合料在浸水后残留稳定度都有所下降,残留稳定度从大到小的排序为:B高黏改性沥青混合料、A高黏改性沥青混合料、SBS改性沥青混合料。

当选用赤泥为填料时,三种沥青混合料的残留稳定度比选用矿粉为填料时的大,说明赤泥能提升沥青混合料的抗水损害能力。

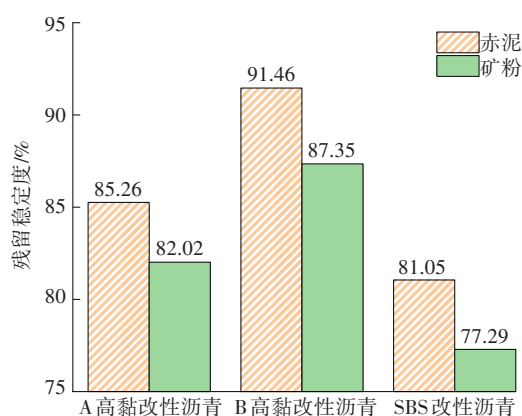


图5 浸水马歇尔试验结果

Fig. 5 Results of immersion Marshall tests

3.3.2 冻融劈裂试验

为进一步评价沥青混合料的水稳定性,本文选用冻融劈裂试验得出三种混合料的冻融劈裂比。试验结果如表9和图6~7所示。

表9 冻融劈裂试验结果

Table 9 Results of freeze-thaw splitting tests

沥青类型	填料类型	冻融循环前的强度/MPa	冻融循环后的强度/MPa	冻融劈裂比/%
A 高黏改性沥青	赤泥	0.701	0.597	85.2
	矿粉	0.514	0.449	87.4
B 高黏改性沥青	赤泥	0.782	0.701	89.6
	矿粉	0.583	0.532	91.3
SBS 改性沥青	赤泥	0.629	0.516	82.0
	矿粉	0.447	0.381	85.2

由图6可知,三种沥青混合料的劈裂强度在经历一次冻融循环后均出现了下降,冻融劈裂比从大到小的排序为:B高黏改性沥青混合料、A高黏改性沥青混合料、SBS改性沥青混合料。这与浸水马歇尔试验的结果一致。当填料为赤泥时,三种沥青混合料的冻融劈裂比相较于填料为矿粉时略有下降。虽然冻融劈裂比可以在一定程度上反映混合料的抗水损害性,但冻融前后劈裂强度的变化仍值得研究。由表9及图7可知,采用赤泥作为填料的沥青混合料的劈裂强度在冻融前后相较于矿粉混合料均有所提升,且提升率都超过了30%。虽然赤泥中的 K_2O 、 Na_2O 等亲水氧化物遇水会膨胀,导致混合料在经历冻融循环后强度下降,但由于赤泥比表面积大且具有多孔结构,以及赤泥中的 Al_2O_3 成分与沥青酸、酸酐发生反应所形成的稳固的化学键能够适当抵消这一部分负面作用,因此使得赤泥作为填料的沥青混合料在经历过冻融损伤后的劈裂强度相较

于矿粉混合料依然有较大提升。

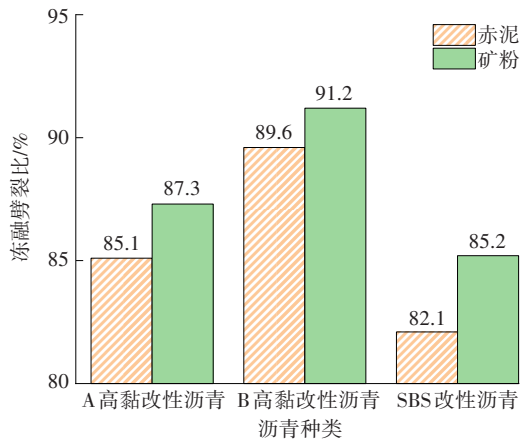


图6 冻融劈裂试验结果

Fig. 6 Results of freeze-thaw splitting tests

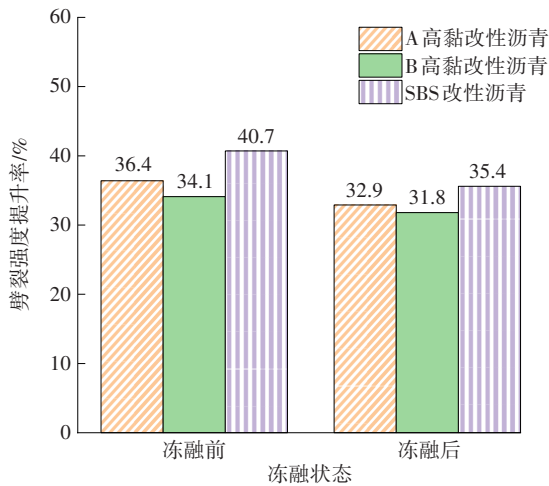


图7 掺入赤泥相比于掺入矿粉的沥青混合料冻融前后劈裂强度提升率

Fig. 7 Splitting strength increase rate of asphalt mixture mixed with red mud before and after freezing and thawing compared with that mixed with mineral powder

3.4 抗松散性能

松散破坏可以视为目前排水沥青路面最主要的病害之一,其抗松散能力直接关乎路面的使用性能和长期耐久性。排水沥青路面出现松散破坏的原因可分为外因和内因两种。外因为:1) 交通荷载:重载车辆在起步、转弯、急刹车时对路面产生的磨耗;2) 自然环境:阳光、雨水、空气、紫外线等因素导致沥青老化。内因为:1) 沥青自身黏度不足;2) 沥青在使用过程中的自然老化,导致其变硬变脆,进一步削弱了黏结力;3) 排水沥青特有的骨架空隙结构虽然有利于排水,但同时也导致其抗剪强度较低,因而在重载或不利环境条件下更易发生松散破坏。

本文选用肯塔堡飞散试验来研究混合料的抗松散性能。试验结果如图8所示。

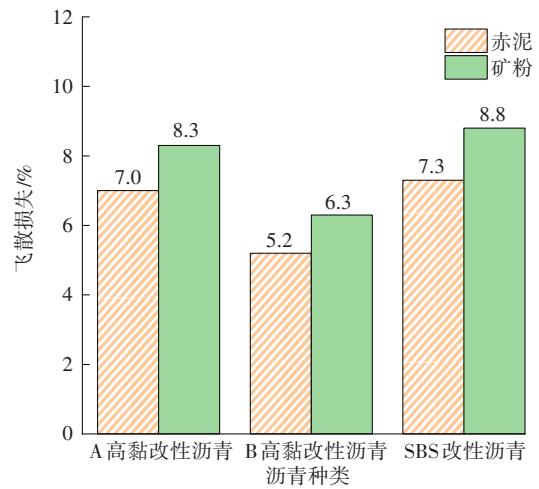


图8 飞散试验结果

Fig. 8 Results of scattering loss tests

由图8可知,对同一种填料而言,飞散损失从大到小的排序为:SBS改性沥青混合料、A高黏改性沥青混合料、B高黏改性沥青混合料。其原因可能是:B高黏改性沥青的黏度最高,因此其与集料之间有更强的黏附性。同时,B高黏改性沥青的黏韧性和韧性最强,因此沥青与集料之间的握裹力和黏结力也就更佳,可以更好地抵御试验过程中的撞击和磨耗作用。由图8可知,赤泥可以提高排水沥青混合料的抗飞散能力,这主要是由于多孔、比表面积大的物理特性和 Al_2O_3 成分的存在。

3.5 抗老化性能

为评价沥青混合料的抗老化性能,本文采用室内热氧老化试验得到三种混合料的老化系数。试验结果如图9所示。

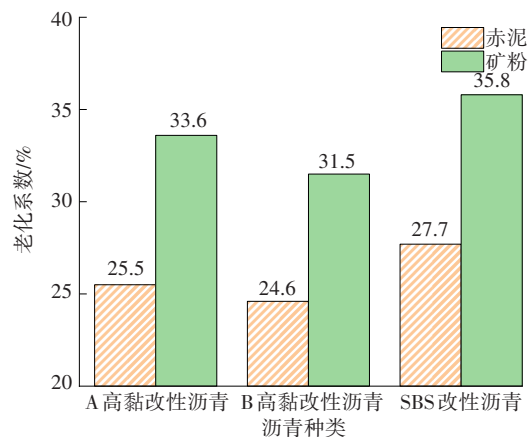


图9 混合料老化试验结果

Fig. 9 Results of mixture aging tests

由图9可知,对同一种填料而言,三种混合料老化系数从大到小的排序为:SBS改性沥青混合料、A高黏改性沥青混合料、B高黏改性沥青混合料。在混合料经历老化过程后,其飞散损失均显著加剧。这一现象可归因于沥青材料的老化效应,具体表现为沥青的脆化加剧,内聚力大幅下降。同时,老化还削弱了沥青与集料之间的附着力。这两种因素相互叠加,共同导致混合料在受到外界作用时更容易发生松散破坏,从而加剧了飞散损失。对比填料分别为赤泥和矿粉时沥青混合料老化试验的结果可以发现,赤泥可以提升混合料的抗老化性能。已有研究表明,沥青胶结料中轻质组分的挥发导致混合料发生老化^[20-21],赤泥因其独特的吸附性能,能够有效地吸附沥青中的轻质组分,从而减缓这些组分的挥发速度,因此添加赤泥的混合料的抗老化性能得到了改善。

4 结论

1) 各项路用性能试验结果表明,用赤泥作填料可有效提高排水沥青混合料的高温性能、水稳性能、抗松散性能和抗老化性能,原因主要是赤泥比表面积大和孔隙结构的物理特性,以及活性金属氧化物 Al_2O_3 的存在可以与沥青酸以及酸酐发生反应形成稳固的化学键。

2) 低温弯曲试验结果显示,赤泥作为填料会对排水沥青混合料低温性能造成一定的损伤,这也是目前多孔、大比表面积类无机填料共有的问题。

3) 在胶结料为AR-HVA高黏改性沥青,填料为赤泥的组合方式下制备而成的排水沥青混合料有着非常好的高温性能、水稳性能、抗松散性能和抗老化性能。

参考文献(References):

- [1] ALJASSAR A H, METWALI S, ALI M A. Effect of filler types on Marshall stability and retained strength of asphalt concrete [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2004, 5 (1): 47-51. DOI: 10.1080/10298430410001733491.
- [2] CHOUDHARY J, KUMAR B, GUPTA A. Laboratory evaluation on recycling waste industrial glass powder as mineral filler in hot mix asphalt[C]//*Proceeding of Civil Engineering Conference: Innovation for Sustainability*. *International Journal of Pavement Engineering*, 2016: 352-359.
- [3] 郭小圣, 傅丽, 郭皎河, 等. 高黏度改性沥青的研制及其PAC-13路用性能研究[J]. *中外公路*, 2022, 42(6): 220-225. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2022.06.042.
- [4] GUO Xiaosheng, FU Li, GUO Jiaohe, et al. Study on preparation and PAC-13 road performance of high viscosity modified asphalt [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2022, 42 (6): 220-225. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2022.06.042.
- [5] MODARRES A, ALINIA BENGAR P. Investigating the indirect tensile stiffness, toughness and fatigue life of hot mix asphalt containing copper slag powder [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2019, 20 (8): 977-985. DOI: 10.1080/10298436.2017.1373390.
- [6] PASANDÍN A R, PÉREZ I. The influence of the mineral filler on the adhesion between aggregates and bitumen [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2015, 58: 53-58. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2015.01.005.
- [7] 刘发荣, 杨风辰. 我国水泥用石灰岩矿产资源现状与需求预测研究[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2004(2): 44-48. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9386.2004.02.015.
- LIU Farong, YANG Fengchen. Status and demand forecast of limestone resources for cement industry in China [J]. *China Non-metallic Minerals Industry*, 2004 (2): 44-48. DOI: 10.3969/j. issn. 1007-9386. 2004. 02.015.
- [7] 吉淳, 赵双, 彭超, 等. 基于流变参数的咖啡渣炭改性沥青抗老化性能分析[J]. *森林工程*, 2020, 36(5): 106-111, 118. DOI: 10.3969/j. issn. 1006-8023. 2020. 05.015.
- JI Chun, ZHAO Shuang, PENG Chao, et al. Analysis of anti-aging performance of coffee ground charcoal modified asphalt based on rheological parameters [J]. *Forest Engineering*, 2020, 36(5): 106-111, 118. DOI: 10.3969/j.issn.1006-8023.2020.05.015.
- [8] XIAO Z F, CHEN M Z, WU S P, et al. Moisture susceptibility evaluation of asphalt mixtures containing steel slag powder as filler[J]. *Materials*, 2019, 12(19): 3211. DOI: 10.3390/ma12193211.
- [9] 周亮. 不同填料对沥青胶浆性能影响分析[J]. *公路工程*, 2013, 38(1): 24-27.
- ZHOU Liang. Analysis of different additive on performance of asphalt mastic [J]. *Highway Engineering*, 2013, 38(1): 24-27.
- [10] 韩先瑞, 张宝虎, 余天航, 等. 铁尾矿沥青混合料水稳定性试验研究[J]. *交通科学与工程*, 2019, 35(2): 6-10. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2019.02.002.
- HAN Xianrui, ZHANG Baohu, YU Tianhang, et al. Experimental study on the moisture stability of the asphalt mixture with iron tailings [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2019, 35(2): 6-10. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2019.02.002.
- [11] 李萃斌, 苏达根, 张京锋. 脱硫灰与石灰石粉复合制备沥青填料研究[J]. *青岛理工大学学报*, 2010, 31(1): 54-57. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4602.2010.01.010.
- LI Cuibin, SU Dagen, ZHANG Jingfeng. Research on preparation of bitumen filler by desulphurization residue

- and limestone powder [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2010, 31 (1): 54-57. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4602.2010.01.010.
- [12] 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. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.02.006.
- WEI Tingting, GU Kun, LI Wenkai. Study on road performance of asphalt mixture with municipal solid waste incineration bottom slag [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19 (2): 61-69. DOI: 10.19951/j. cnki. 1672-9331.2022.02.006.
- [13] ASI I, ASSA'AD A. Effect of Jordanian oil shale fly ash on asphalt mixes [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17 (5): 553-559. DOI: 10.1061/(asce)0899-1561(2005)17: 5(553).
- [14] WU S P, ZHU J Q, ZHONG J J, et al. Experimental investigation on related properties of asphalt mastic containing recycled red brick powder [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(6): 2883-2887. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.12.040.
- [15] MODARRES A, RAHMANZADEH M. Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2014, 66: 476-483. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.002.
- [16] CHOUDHARY J, KUMAR B, GUPTA A. Application of waste materials as fillers in bituminous mixes [J]. Waste Management, 2018, 78: 417-425. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.06.009.
- [17] 包惠明, 牟卡莉. 赤泥改性沥青黏度及微观特性[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2017, 38(5): 47-50, 6. DOI: 10.15926/j.cnki.issn1672-6871.2017.05.010.
- BAO Huiming, MU Kali. Viscosity and microscopic characteristics of red mud modified asphalt [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2017, 38 (5): 47-50, 6. DOI: 10.15926/j.cnki.issn1672-6871.2017.05.010.
- [18] ZHANG H J, LI H, ZHANG Y, et al. Performance enhancement of porous asphalt pavement using red mud as alternative filler [J]. Construction and Building Materials, 2018, 160: 707-713. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.105.
- [19] ZHANG J Z, LI P Z, LIANG M, et al. Utilization of red mud as an alternative mineral filler in asphalt mastics to replace natural limestone powder [J]. Construction and Building Materials, 2020, 237: 117821. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117821.
- [20] 万森, 吴少鹏, 王子鹏, 等. 基于组分挥发与基团变化的沥青老化机制研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2017, 41 (4): 673-677. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2017.04.028.
- WAN Miao, WU Shaopeng, WANG Zipeng, et al. Investigation on bitumen ageing mechanism by components volatilization and functional group changes [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2017, 41 (4): 673-677. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2017.04.028.
- [21] 周志刚, 王岩, 李刚, 等. 酸雨对透水沥青路面抗滑耐久性的影响[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(5): 53-63. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021122323101966.
- ZHOU Zhigang, WANG Yan, LI Gang, et al. Effect of acid rain on anti-sliding durability of porous asphalt pavement [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39 (5): 53-63. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021122323101966.

(责任编辑:薛仪)

(上接第52页)

- 学版), 2018, 52 (10): 1911-1918. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2018.10.010.
- YE Judong, YANG Zhenjun, LIU Guohua, et al. Analytical solution and experimental verification of pullout force of twisted steel fibers in ultra-high performance concrete [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52 (10): 1911-1918. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2018.10.010.
- [15] WILLE K, NAAMAN A E. Pullout behavior of high-strength steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete [J]. ACI Materials Journal, 2012, 109(4): 479-488. DOI: 10.14359/51683923.
- [16] XU M, HALLINAN B, WILLE K. Effect of loading rates on pullout behavior of high strength steel fibers embedded in ultra-high performance concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 70: 98-109. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.03.014.
- [17] 叶群山, 羊治宇, 周剑波. 生物油再生沥青-集料界面分子模拟研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(4): 39-46. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022012923081978.
- YE Qunshan, YANG Zhiyu, ZHOU Jianbo. Molecular simulation on interface between bio-oil recycled asphalt and aggregate [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39 (4): 39-46. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022012923081978.
- [18] 张志彪, 郭蒙蒙, 朱茹琳, 等. 钢纤维掺量对混凝土抗拉疲劳性能影响的试验研究[J]. 中外公路, 2021, 41 (2): 291-295. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.02.058.
- ZHANG Zhibiao, GUO Mengmeng, ZHU Rulin, et al. Experimental study on influence of amount of steel fiber on tensile fatigue performance of concrete [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41 (2): 291-295. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.02.058.

(责任编辑:薛仪)