

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202310162024081970

文章编号:1674-599X(2024)04-0040-07

引用格式:李元昊,邵景干,黄运军,等.矿渣砂-水镁石纤维沥青混合料性能研究[J].交通科学与工程,2024,40(4):40-46.

Citation: LI Yuanhao, SHAO Jinggan, HUANG Yunjun, et al. Study on properties of slag sand and brucite fiber asphalt mixture[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(4): 40-46.

矿渣砂-水镁石纤维沥青混合料性能研究

李元昊¹, 邵景干^{2,3}, 黄运军^{2,3}, 李文凯^{2,3}, 王俊超^{2,3}

(1. 河南中州路桥建设有限公司, 河南 周口 466000; 2. 河南交院工程技术集团有限公司, 河南 郑州 450046;
3. 绿色高性能材料应用技术交通运输行业研发中心, 河南 郑州 450046)

摘要: 选用等质量的水镁石纤维及矿渣砂替代石灰岩机制砂以制备矿渣砂-水镁石纤维沥青混合料, 并评价该混合料的高温抗车辙、低温抗开裂及抗水损害等路用性能, 及探究矿渣砂的合理掺量。在深入研究矿渣砂与水镁石纤维等原材料特性的基础上, 进一步研究它们共同应用于沥青混合料中的技术可行性与潜在优势; 通过配合比设计, 确定不同矿渣砂及水镁石纤维掺量组合下混合料的最佳油石比; 通过开展高低温及水稳定性等室内试验, 评价矿渣砂-水镁石纤维沥青混合料的路用性能。研究结果表明: 不同时期生产的矿渣砂级配差距较大, 使用时需先进行分档筛分再重组, 以满足级配要求; 矿渣砂不含有毒物质, 不会对环境及人体身心健康造成危害; 水镁石纤维能够改善矿渣砂沥青混合料的酸性环境, 增强沥青与矿料之间的黏附能力; 矿渣砂的掺入, 会降低沥青混合料高低温性能及水稳定性, 掺量越大, 则降低幅度越大; 水镁石纤维的掺入, 能改善矿渣砂沥青混合料的路用性能, 当矿渣砂掺量为20%, 水镁石纤维掺量为0.4%时, 沥青混合料的水稳定性与常规AC-13C沥青混合料的相当, 而其高低温性能则明显优于常规AC-13C沥青混合料的。因此, 使用矿渣砂等质量替代石灰岩机制砂, 并添加水镁石纤维制备沥青混合料具备可行性和实用价值。

关键词: 矿渣砂; 水镁石纤维; 油石比; 沥青混合料; 路用性能

中图分类号: U414

文献标志码: A

Study on properties of slag sand and brucite fiber asphalt mixture

LI Yuanhao¹, SHAO Jinggan^{2,3}, HUANG Yunjun^{2,3}, LI Wenkai^{2,3}, WANG Junchao^{2,3}

(1. Henan Zhongzhou Road and Bridge Construction Co., Ltd., Zhoukou 466000, China; 2. Henan Jiaoyuan Engineering Technology Group Co., Ltd., Zhengzhou 450046, China; 3. R & D Center of Green High Performance Material Application Technology Transportation Industry, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: The slag sand-fiber asphalt mixture was prepared by using magnesite fiber and slag sand instead of limestone machine-made sand. The pavement performance of the mixture was evaluated, and the reasonable content of slag sand was explored high temperature rutting resistance, low temperature cracking resistance, and water damage resistance was measured. Based on the study of raw materials such as slag sand and brucite fiber, the characteristics of slag sand and brucite fiber and the feasibility of their joint application in asphalt mixture were evaluated. The optimum oil stone ratio of the mixture with different slag sand and brucite fiber content was determined. The road performance of slag sand-fiber asphalt mixture was evaluated by laboratory tests of high and low temperature and water stability. The grading of slag sand produced in different periods is very different, and it needs to be

收稿日期: 2023-10-16

基金项目: 交通运输部重点科技项目(2021-TG-001); 河南交院工程技术集团有限公司2023年度研发项目(2023JK-03)

通信作者: 邵景干(1970—), 男, 高级工程师, 主要从事新材料应用技术方面的研究工作。E-mail: 632596972@qq.com

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

adjusted after grading and screening to meet the grading requirements. The slag sand does not contain toxic substances and will not cause harm to the environment and human physical and mental health. Brucite fiber can improve the acidic environment of slag sand asphalt mixture and enhance the adhesion ability between asphalt and ore. With the addition of slag sand, the high and low temperature stability and water stability of asphalt mixture are reduced to different degrees, and the greater the amount of addition, the more significant the decrease. With the addition of brucite fiber, the related road performance of slag sand asphalt mixture is improved. The water stability of asphalt mixture containing 20% slag sand and 0.4% brucite fiber is equivalent to that of conventional AC-13C asphalt mixture, and the high and low temperature performance is better than that of conventional AC-13C asphalt mixture. It is feasible to use slag sand as fine aggregate instead of limestone sand to prepare hydrogypsum fiber asphalt mixture, which has considerable economic and environmental benefits.

Key words: slag sand; brucite fiber; oil stone ratio; asphalt mixture; pavement performance

2019年我国尾矿存量高达70亿t,且每年呈现快速增长的趋势,2022年我国尾矿累积存量已近207亿t,但我国尾矿的再生利用率仅有20%,而发达国家尾矿的再生利用率高达80%^[1]。尾矿体量的增加不仅会占用大量的土地资源,而且尾矿中有害化学物质会对周边环境造成污染,严重影响人们的身心健康。鉴于此,为了实现资源的高效循环利用与生态环境的可持续发展,加快探索并实施尾矿资源的再生利用策略已刻不容缓。针对我国铁尾矿存量高达尾矿总量51%的严峻现状,科学地将这些铁尾矿运用于公路工程领域,不仅能够有效地解决铁尾矿堆积所引发的环境问题,还能在一定程度上解决当前砂石料资源日益紧张的问题,这一举措深度契合了我国长期秉持的绿色发展理念。

近年来,道路工作者针对矿渣砂及水镁石纤维在工程中应用的可行性开展了大量的研究。汪金花等^[2-3]利用光谱分析理论对铁尾矿开展了研究,揭示了铁尾矿不同颗粒大小及不同干湿环境下的光谱特征,发现在500~600 nm波段内光谱值受环境湿度、颗粒大小及矿床类别等因素影响较小。韩国某施工企业与德国布朗斯威格大学^[4]共同进行了再生沥青铁尾矿沥青混合料性能研究,结果表明:再生沥青掺量为20%的混合料抗疲劳及低温抗开裂性能与掺量为50%的铁尾矿混合料的相当,说明再生沥青-铁尾矿沥青混合料能够应用于路面工程中。肖庆一等^[5]将一定比例的矿渣砂等质量替换沥青混合料中的细集料,并开展相关路用性能的研究,提出了动态模量主曲线理论。结果表明:采用合理的矿渣砂掺量时,沥青混合料相关技术指标能够满足规范要求。蒋雷鸣等^[6]将不同长度的水镁石纤维按

照一定的比例掺入沥青混合料中,并开展相关性能试验,研究发现:当纤维掺量为0.4%(占沥青混合料质量),长度为1~5 mm时,沥青路面整体性能较优,与常规混合料相比,动稳定度提高了26%,弯曲破坏应变提高了25%。陈金龙^[7]对混掺纤维沥青混合料性能进行了研究,发现在玄武岩纤维与水镁石纤维混掺比例为3:2时,混合料高低温性能及水稳定性最优。

现有文献大多聚焦于铁尾矿沥青混合料及水镁石纤维沥青混合料的性能研究。因此,本文旨在利用水镁石纤维独特的碱性特性,以针对性地改善矿渣砂沥青混合料的性能。

基于此,本文使用不同掺量的矿渣砂、水镁石纤维,对AC-13C沥青混合料开展高温抗车辙、低温抗开裂及抗水损害等路用性能试验,以评价矿渣砂在路面工程应用中的可行性,为实际工程提供理论支撑。

1 原材料

1.1 沥青

本文选用山东隆世达新材料科技有限公司生产,级别为I-D的苯乙烯-丁二烯-苯乙烯(styrene-butadiene-styrene, SBS)改性沥青进行研究,其主要指标见表1。

1.2 矿渣砂

本文选用由鞍钢集团有限公司生产的矿渣砂,不同时期取样的筛分结果见表2,矿渣砂与本文所用石灰岩机制砂的矿物成分组成及表观相对密度见表3。

表1 沥青主要技术指标检测结果

Table 1 Test results of main technical indicators of asphalt

项目	针入度(25 °C)/ (0.1 mm)	软化 点/°C	延度(5 cm/ min, 5 °C)/cm	闪点/°C	135 °C旋转 黏度/(Pa· s)	25 °C弹性 恢复率/%	贮存稳定性 离析, 48 h软 化点差	旋转薄膜加热试验后残留物		
								质量变 化/%	针入度比 (25 °C)/%	残留延度 (5 °C)/cm
技术要求	40.00 ~ 60.00	≥60.00	≥20.00	≥230.00	≤3.00	≥75.00	≤2.50	±1.00	≥65.00	≥15.00
试验结果	51.00	62.00	34.00	251.00	1.84	83.00	2.00	-0.18	67.00	24.00

表2 矿渣砂筛分结果

Table 2 Sieving results of slag sand

样品 序号	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%							
	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
1#	100.0	100.0	84.6	79.2	48.7	32.6	24.7	8.9
2#	100.0	97.4	79.8	69.4	38.1	28.6	19.7	6.8
3#	100.0	94.8	74.6	62.1	34.7	21.5	12.1	3.2

表3 矿渣砂与机制砂矿物成分组成及表观相对密度

Table 3 Material composition and apparent relative density of slag sand and mechanized placer

集料 类型	各种矿物质质量分数/%									表观 相对 密度
	w (SiO ₂)	w (Al ₂ O ₃)	w (Fe ₂ O ₃)	w (CaO)	w (MgO)	w (TiO ₂)	w (Na ₂ O)	w (K ₂ O)	其他	
矿渣 砂	64.70	9.23	7.47	6.12	4.21	3.18	2.23	1.29	1.57	2.837
机制 砂	15.57	2.23	1.67	56.06	23.11	0.12	0.08	0.27	0.89	2.754

由表2、表3可知,矿渣砂不同样品的筛分结果存在较大的差异,且存在级配不良的现象,若直接使用会影响沥青路面性能,可将其进行分档筛分后进行重组,以满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中S15的级配要求。参照工程中岩石酸碱性的分类依据,定义当SiO₂质量分数大于65.00%时矿料呈酸性。由于矿渣砂中SiO₂质量分数为64.70%,因此其呈弱酸性,会对沥青混合料的水稳定性能产生不利影响,而矿渣砂中无铅、砷、汞等有毒物质,不会对环境及人体身心健康造成危害;机制砂中SiO₂质量分数为15.57%,为超基性碱性材料。相较于矿渣砂,其SiO₂质量分数有所减少,CaO质量分数有所增加,表明石灰岩机制砂碱性更强,与沥青之间的黏结能力也更强。由于矿渣砂与石灰岩机制砂表观相对密度相差不大,等质量替代对混合料嵌挤结构的影响不大。

1.3 水镁石纤维

本研究选用由石家庄汇锦矿产品有限公司生产的水镁石纤维,主要指标检测结果见表4。

表4 水镁石纤维主要技术指标试验结果

Table 4 Test results of main technical indexes of brucite fiber

相对 密度	抗拉强 度/MPa	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	碱失 量/%	加热后 质量损 失率/%	吸湿 率/%	吸油 率/倍
2.51	1 274	0.148	2.46	0.67	0.87	2.12

2 配合比设计

针对AC-13C沥青混合料,引入矿渣砂与水镁石纤维作为关键组成成分进行研究,常见的矿料级配设计见表5,其中粗集料为石灰岩碎石,细集料为石灰岩机制砂,填料由石灰岩磨细制得。结合课题组前期研究成果,用矿渣砂分别以0%、10%、20%、30%比例等质量替代机制砂,水镁石的掺量为0.3%、0.4%(占沥青混合料质量),不同矿渣砂替代比例及不同水镁石纤维掺量下马歇尔试验结果见表6。

表5 级配设计结果

Table 5 Grading design results

混合料	类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%								
		13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC-13C	上限	100.0	85.0	68.0	50.0	38.0	28.0	20.0	15.0	8.0
	下限	90.0	68.0	38.0	24.0	15.0	10.0	7.0	5.0	4.0
	目标 级配	94.2	77.9	54.8	35.4	24.8	17.6	12.1	9.7	5.7

表6 马歇尔试验结果

Table 6 Marshall test results

混合料类型	最佳油 石比/%	毛体积相 对密度	孔隙 率/%	矿料 间隙 率/%	沥青 饱和 度/%	马歇尔 稳定 度/kN
AC-13C	5.07	2.442	4.7	15.3	69.2	11.68
AC-13C(10%矿渣砂)	5.12	2.452	4.6	15.6	69.7	11.35
AC-13C(20%矿渣砂)	5.09	2.459	4.6	15.1	69.8	11.58
AC-13C(30%矿渣砂)	5.15	2.455	4.5	15.3	69.3	11.23
AC-13C(10%矿渣 砂+0.3%纤维)	5.21	2.448	4.4	15.5	68.6	13.18
AC-13C(10%矿渣 砂+0.4%纤维)	5.24	2.446	4.5	14.9	68.5	13.07
AC-13C(20%矿渣 砂+0.3%纤维)	5.24	2.452	4.6	15.2	68.8	13.78

表 6 (续)
Table 6 (Continued)

混合料类型	最佳油石比/%	毛体积相对密度	孔隙率/%	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%	马歇尔稳定度/kN
AC-13C(20%矿渣砂+0.4%纤维)	5.26	2.450	4.7	15.1	68.5	13.51
AC-13C(30%矿渣砂+0.3%纤维)	5.23	2.449	4.5	15.4	68.4	12.98
AC-13C(30%矿渣砂+0.4%纤维)	5.27	2.444	4.6	15.6	68.6	12.65

3 路用性能

3.1 水稳定性

水损害是沥青路面在季节性多雨地区常见的病害,其成因主要归结于雨水持续冲刷、车辆轮胎制动以及路面结构层内部孔隙中动水压力的综合作用。这些外部因素导致沥青路面性能受损,沥青与碎石之间的黏附力显著下降,进而导致沥青层剥落、路面松散甚至形成坑槽。这些病害的显现,正是沥青路面水稳定性不足的直接体现,影响道路使用性能和安全性^[8-13]。由于矿渣砂与沥青均属于偏弱酸性材料,两者之间的相容性较差,会降低沥青与石灰岩碎石之间的黏附力,从而影响沥青路面的水稳定性。而水镁石纤维偏弱碱性,掺入到沥青混合料中能够改善混合料内部的酸性环境,增强沥青与碎石间的黏附能力。因此,开展矿渣砂-水镁石纤维沥青混合料抗水损害性能的研究至关重要。本研究选用浸水马歇尔试验及冻融劈裂试验,对不同矿渣砂及水镁石纤维掺量下的 AC-13C 沥青混合料开展水稳定性分析,试验结果如图 1、图 2 所示。

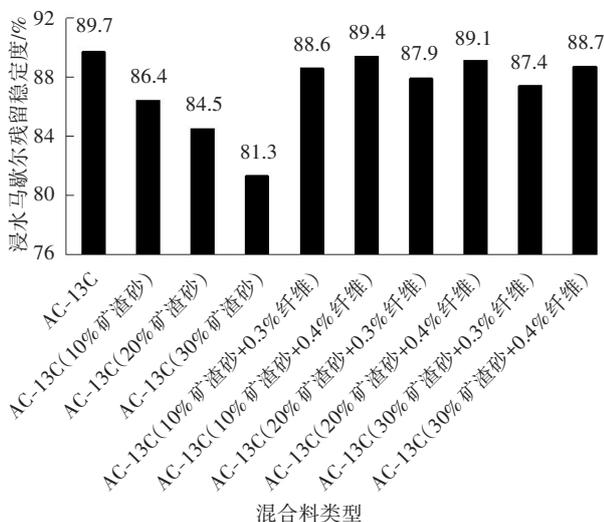


图 1 残留稳定度试验结果

Fig. 1 Residual stability test results

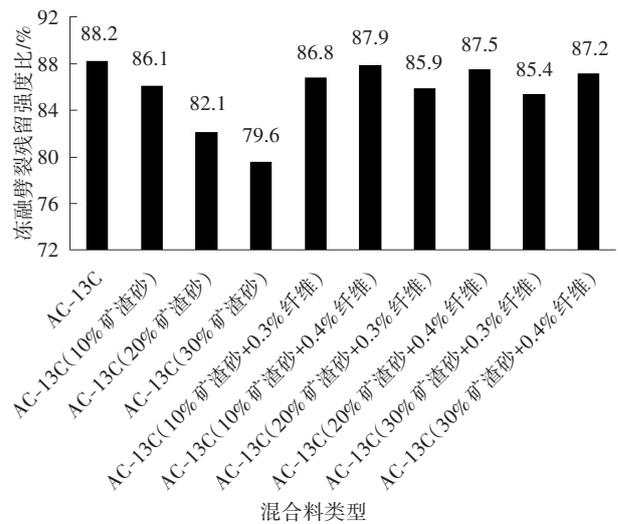


图 2 残留强度比试验结果

Fig. 2 Residual strength ratio test results

由图 1、图 2 可知,随着矿渣砂掺量的增加(未掺入水镁石纤维),沥青混合料浸水马歇尔残留稳定度及冻融劈裂残留强度比均呈现逐渐降低的趋势,当矿渣砂掺量为 10%、20%、30% 时,残留稳定度降低率分别为 3.68%、5.80%、9.36%,残留强度比降低率分别为 2.38%、6.92%、9.75%,表明仅掺入矿渣砂会降低混合料的抗水损害能力。这可能是由于矿渣砂相较于石灰岩机制砂具有较高的吸水率,因此展现出更强的亲水性。当含有矿渣砂的马歇尔试件长时间浸泡在水中时,由于水分子对其表面强烈的亲附作用,试件易出现剥落现象。且随着水温的升高,水分子运动还会加剧,使这种剥落现象变得更为显著,从而对试件的稳定性产生不利影响。当水镁石纤维掺量为 0.3%、0.4% 时,不同矿渣砂掺量的混合料残留稳定度及残留强度比得到显著改善,当水镁石纤维掺量为 0.4% 时改善效果更优。这可能是由于水镁石纤维能够在混合料内部实现三维乱相分散,能有效地束缚矿料颗粒,同时通过碱化作用增强了矿料颗粒的活性,并显著提升了矿渣砂与沥青之间的黏附力。此外,水镁石纤维还能吸附沥青中沥青质和胶质成分,这一特性使得结构沥青的质量分数增加,增大了矿料颗粒之间的黏结力,使得混合料的整体性能得到显著的提升。

3.2 低温抗裂性

沥青路面裂缝病害的类型有多种,其中反射裂缝及温缩裂缝是最常见的裂缝病害类型。反射裂缝的形成始于下承层(如基层或底基层)的初始开裂。随着这些裂缝逐渐扩展和加深,它们会在沥青

面层与下承层之间的界面上产生拉应力。当拉应力累积并超过沥青面层底部的抗拉强度时,面层底部便开始出现裂缝。随后,在车辆轴载的持续作用下,这些裂缝会随着时间的推移逐渐向上扩展,最终反射至路面表面,形成可见的反射裂缝。温缩裂缝是由于昼夜之间显著的温度变化,使沥青路面结构层内部产生温缩应力,当这种温缩应力累积并超过结构层材料的拉应力极限时,沥青路面就会出现开裂现象。温缩裂缝的形成,反映了沥青路面在低温环境下抗开裂能力不足^[14-16]。本文选用室内-10℃低温下的小梁弯曲试验对不同矿渣砂及水镁石纤维掺量下的AC-13C沥青混合料开展低温抗开裂能力评价,低温弯曲破坏应变试验结果如图3所示。

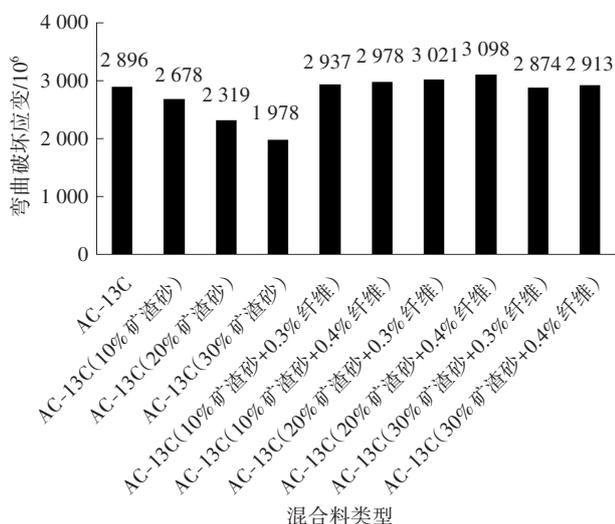


图3 低温破坏应变试验结果

Fig. 3 Low temperature failure strain test results

由图3可知,随着矿渣砂掺量的增加(未掺入水镁石纤维),沥青混合料低温弯曲破坏应变逐渐降低,矿渣砂掺量为10%、20%、30%时,低温弯曲破坏应变降低率分别为7.53%、19.92%、31.70%,表明仅掺入矿渣砂会降低混合料的低温抗开裂能力。这可能是由于沥青与矿料之间的黏结作用处于一种动态平衡状态,虽然沥青中的组分在分子间力的作用下能依附于矿料表面,但也易于脱附。相较于石灰岩机制砂,矿渣砂表面酸性更强,矿渣砂与沥青分子间的作用力较强,化学黏附能力较差,矿渣砂的掺入会降低沥青与矿料之间的黏结能力,导致小梁试件的稳定性变差。同时,矿渣砂掺量越高,混合料中的自由沥青越多,小梁试件在荷载作用下裂缝的发展越快,承受弯拉荷载的能力也越差。当水镁石纤维掺量为0.3%、0.4%时,不同矿渣砂掺量的

混合料低温破坏应变得到了显著改善,其中矿渣砂掺量为20%、水镁石掺量为0.4%时改善效果最佳。这可能是由于水镁石纤维呈弱碱性,掺入到沥青混合料中能够改善混合料的酸性环境,增强沥青与矿料之间的黏结能力。同时,纤维具有一定的韧性,三维乱相分散到混合料后能够起到吸附、稳定沥青的作用,增强小梁试件的整体稳定性。

3.3 高温稳定性

近年来,受“温室效应”加剧的影响,夏季极端高温天气(尤其是超过40℃的酷暑天气)变得愈发频繁。沥青路面因其黑色或深褐色的外观而具备高吸热性,导致路面结构层内部温度频繁升高至65℃以上,这一温度远超过SBS I-D改性沥青材料所规定的软化点(60℃)。在此高温条件下,路面承受车辆轴载,特别是重型轴载的反复作用,极易引发沥青混合料的永久塑性变形,进而形成车辙病害。随着车辆轴载作用的累积,沥青路面内部会发生显著的剪切流动,塑性变形程度不断加剧,严重影响了路面的使用寿命和性能^[17-20]。车辙病害的逐渐恶化不仅会严重影响沥青路面的平整度,而且会使路面存在雨天积水风险,影响行车安全。本研究选用室内60℃车辙试验对不同矿渣砂及水镁石纤维掺量下的AC-13C沥青混合料开展高温抗车辙能力分析,动稳定度试验结果如图4所示。

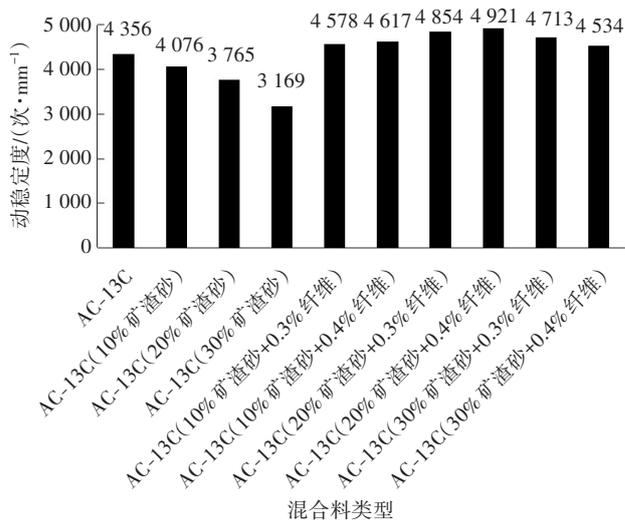


图4 动稳定度试验结果

Fig. 4 Dynamic stability test results

由图4可知,随着矿渣砂掺量的增加(未掺入水镁石纤维),沥青混合料动稳定度试验结果逐渐降低,当矿渣砂掺量为10%、20%、30%时,动稳定度降低率分别为6.43%、13.57%、27.25%。这可能是由于

矿渣砂掺量的增加使沥青与矿料之间的黏附能力逐渐减弱,矿料之间的内摩擦力降低,高温环境下抗车辆轴载塑性变形的能力下降。当水镁石纤维掺量为0.3%、0.4%时,不同矿渣砂掺量下的混合料动稳定度得到显著改善,其中当矿渣砂掺量为20%、水镁石掺量为0.4%时改善效果更佳。这可能是由于水镁石纤维呈弱碱性,能够中和矿渣砂掺入带来的酸性环境,增强矿料与沥青的黏结能力,增大矿料之间的内摩擦力,同时水镁石纤维不仅能够吸附、稳定沥青,提高结构沥青占比,还具有良好的力学性能,能够在矿料之间起到桥接的作用,限制荷载作用下矿料的错位、滑移,提升车辙板的整体稳定性能,提高沥青路面的高温抗车辙能力。

4 结论

本文通过对矿渣砂、水镁石纤维原材料性能及不同矿渣砂及水镁石纤维掺量下的AC-13C沥青混合料路用性能研究,得出以下结论:

1) 矿渣砂不含有毒物质,属于酸性材料,分档筛分重组后级配能满足要求;水镁石纤维属于碱性材料,具有良好的力学性能,能够中和矿渣砂的酸性环境,改善矿渣砂沥青混合料性能。

2) 随着矿渣砂掺量的增加,AC-13C沥青混合料抗水损害、低温抗开裂及高温抗车辙能力均呈现逐渐降低的趋势。当掺入0.3%、0.4%水镁石纤维时,AC-13C沥青混合料抗水损害、低温抗开裂及高温抗车辙能力均得到改善。而当矿渣砂掺量为20%、水镁石纤维掺量为0.4%时,沥青混合料水稳定性能与常规AC-13C沥青混合料的相当,但其低温抗开裂及高温抗车辙性能显著比常规AC-13C沥青混合料的好。

参考文献(References):

- [1] 郭冬艳,吴尚昆,张玉韩. 京津冀地区砂石矿产供需形势分析及资源开发利用基地划定[J]. 中国矿业, 2019, 28(8): 26-29.
GUO Dongyan, WU Shangkun, ZHANG Yuhan. Analysis of the supply and demand of sandstone minerals and the delimitation of resource development base in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. China Mining Magazine, 2019, 28(8): 26-29.
- [2] 汪金花,曹兰杰,郭云飞,等. 铁尾矿高-多光谱遥感特征分析与信息识别[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2019, 41(5): 974-981. DOI: 10.7540/j.ynu.20180656.

- WANG Jinhua, CAO Lanjie, GUO Yunfei, et al. Feature analysis and information identification of the iron tailings by high-multispectral remote sensing[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2019, 41(5): 974-981. DOI: 10.7540/j.ynu.20180656.
- [3] 汪金花,曹兰杰,白洋,等. 铁尾矿粒径和湿度因子对高光谱特征参量影响[J]. 矿产综合利用, 2019(2): 128-133. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6532.2019.02.027.
WANG Jinhua, CAO Lanjie, BAI Yang, et al. Influence of iron tailings' particle size and humidity factor on hyperspectral characteristic parameters [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019 (2): 128-133. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6532.2019.02.027.
- [4] MOON K H, CANNONE FALCHETTO A, WANG D, et al. Experimental investigation on fatigue and low temperature properties of asphalt mixtures designed with reclaimed asphalt pavement and taconite aggregate [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2019, 2673 (3): 472-484. DOI: 10.1177/0361198119835525.
- [5] 肖庆一,余天航,陈向阳,等. 铁尾矿沥青混合料动态模量试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(5): 85-90, 102. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2020.05.13.
XIAO Qingyi, YU Tianhang, CHEN Xiangyang, et al. Experimental study on dynamic modulus of iron tailings asphalt mixture [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39(5): 85-90, 102. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2020.05.13.
- [6] 蒋雷鸣,胡军安. 水镁石纤维沥青混合料路用性能研究[J]. 广东化工, 2019, 46(22): 9-10, 13. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1865.2019.22.005.
JIANG Leiming, HU Jun'an. Study on road performance of brucite fiber asphalt mixture [J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, 46 (22): 9-10, 13. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1865.2019.22.005.
- [7] 陈金龙. 玄武岩/水镁石纤维沥青混合料路用性能室内试验研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.
CHEN Jinlong. Laboratory experimental research on road performance of basalt/brucite fiber-reinforced asphalt mixture [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020.
- [8] 方俊杰,冯明杰,谢涛,等. 基于XRD分析的钢渣填料沥青混合料水稳定性研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(1): 35-41. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210907001.
FANG Junjie, FENG Mingjie, XIE Tao, et al. Research on water stability of steel slag filling asphalt mixture

- based on XRD [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39 (1) : 35-41. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210907001.
- [9] 张争奇, 谢菲, 张天天, 等. 钢渣沥青混合料超薄磨耗层路用性能及其时变性[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2023, 44(4) : 475-482. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7775.2023.04.015.
- ZHANG Zhengqi, XIE Fei, ZHANG Tiantian, et al. Road performance and time variation of ultra-thin wear layer of steel slag asphalt mixture [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2023, 44 (4) : 475-482. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7775.2023.04.015.
- [10] 胡春华, 王诚. 玻璃纤维钢渣 PAC-13 沥青混合料路用性能评价[J]. 中国科技论文, 2023, 18(6) : 596-600. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2783.2023.06.003.
- HU Chunhua, WANG Cheng. Road performance evaluation of glass fiber steel slag PAC-13 asphalt mixture [J]. China Sciencepaper, 2023, 18 (6) : 596-600. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2783.2023.06.003.
- [11] 柳力, 朱晓明, 刘朝晖, 等. 钢渣掺量对橡胶沥青混合料 ARAC-13 性能的影响[J]. 材料导报, 2023, 37(10) : 66-72. DOI: 10.11896/cldb.22080175.
- LIU Li, ZHU Xiaoming, LIU Zhaohui, et al. Effect of steel slag content on performance of rubber mixture ARAC-13 [J]. Materials Reports, 2023, 37(10) : 66-72. DOI: 10.11896/cldb.22080175.
- [12] 陈佳铮. 硅藻土与聚酯纤维复合改性沥青混合料的路用性能研究[J]. 合成材料老化与应用, 2023, 52(3) : 62-64. DOI: 10.16584/j.cnki.issn1671-5381.2023.03.006.
- CHEN Jiazheng. Study on road performance of diatomite and polyester fiber composite modified asphalt mixture [J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2023, 52 (3) : 62-64. DOI: 10.16584/j. cnki. issn1671-5381.2023.03.006.
- [13] 刘洪磊, 邵景干, 姜帅, 等. 橡胶粉高黏改性排水沥青混合料性能研究[J]. 粘接, 2023, 50(8) : 4-8. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5922.2023.08.002.
- LIU Honglei, SHAO Jinggan, JIANG Shuai, et al. Study on properties of high viscosity modified drainage asphalt mixture of rubber powder [J]. Adhesion, 2023, 50(8) : 4-8. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5922.2023.08.002.
- [14] 张四恒, 黄运军, 邵景干, 等. 矿料级配与沥青对薄层罩面路用性能的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(3) : 59-68. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.03.006.
- ZHANG Siheng, HUANG Yunjun, SHAO Jinggan, et al. Influence of mineral aggregate gradation and asphalt on pavement performance of thin overlay [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19 (3) : 59-68. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.03.006.
- [15] 时彦宁. 铁尾矿砂在沥青混合料中的应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- SHI Yanning. Research on iron tailings sand in the application of asphalt mixture [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [16] 王庆, 李文凯, 邵景干, 等. 混掺纤维 AC-13C 沥青混合料性能及效益研究[J]. 河南科学, 2022, 40(3) : 403-411. DOI: 10.3969/j.issn.1004-3918.2022.03.009.
- WANG Qing, LI Wenkai, SHAO Jinggan, et al. Study on performance and benefit of fiber AC-13C asphalt mixture [J]. Henan Science, 2022, 40 (3) : 403-411. DOI: 10.3969/j.issn.1004-3918.2022.03.009.
- [17] 刘莹. 掺钢渣再生沥青混合料性能研究[J]. 公路与汽运, 2023 (4) : 57-60. DOI: 10.20035/j. issn. 1671-2668.2023.04.011.
- LIU Ying. Study on properties of recycled asphalt mixture mixed with steel slag [J]. Highways & Automotive Applications, 2023 (4) : 57-60. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.04.011.
- [18] 罗程, 颜峰, 周彬, 等. 钢渣沥青混合料的路用性能及体积稳定性研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(1) : 17-25. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210409001.
- LUO Cheng, YAN Feng, ZHOU Bin, et al. Research on the road performance and volume stability of steel slag asphalt mixes [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39 (1) : 17-25. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210409001.
- [19] 梁波, 张海涛, 刘政, 等. 纤维改性沥青混合料性能研究进展[J]. 中外公路, 2023, 43(3) : 1-16. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2023.03.001.
- LIANG Bo, ZHANG Haitao, LIU Zheng, et al. Research progress on properties of fiber modified asphalt mixture [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43 (3) : 1-16. DOI: 10.14048/j. issn. 1671-2579.2023.03.001.
- [20] 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.

(责任编辑:薛仪;英文编辑:冯硕)