

掺蔗渣纤维橡胶沥青再生混合料路用性能研究

蒋鑫

(广西交通投资集团 柳州高速公路运营有限公司, 广西 柳州 545036)

摘要:针对沥青混合料回收料、废旧轮胎胶粉、蔗渣纤维潜在的资源价值,探索多种固废协同利用具有一定的现实意义。该文通过研究蔗渣纤维的微观结构及热特性,进行掺蔗渣纤维橡胶沥青再生混合料的配合比设计、路用性能评价及试验段铺筑与观测。结果表明:蔗渣纤维具有多层纤维壁的空心腔腔结构,有利于吸附混合料中的自由沥青,增强蔗渣纤维与沥青之间的黏附性;蔗渣纤维与木质素纤维热重曲线基本一致,但在热失重的第二阶段,蔗渣纤维呈现出双峰结构,木质素纤维表现为单峰形状;掺加蔗渣纤维后,橡胶沥青再生混合料动稳定度值提高了约24.6%,低温弯曲破坏应变值提高了约19.3%,浸水马歇尔残留稳定性和冻融劈裂残留强度比分别提高了约4.7%、8.6%,铺筑的试验段使用状况良好。整体而言,蔗渣纤维对于改善橡胶沥青再生混合料的路用性能具有一定的功效,提升了混合料的抗变形能力,增强了集料的骨架效果,提高了混合料整体结构强度和韧性。

关键词:道路工程;再生沥青混合料;橡胶沥青;蔗渣纤维;路用性能

中图分类号:U414

文献标志码:A

Road Performance of Reclaimed Asphalt Mixture Mixed with Bagasse Fibers and Rubber-Modified Asphalt

JIANG Xin

(Guangxi Communications Investment Group Liuzhou Expressway Operation Co., Ltd., Liuzhou, Guangxi 545036, China)

Abstract: Given the potential resource value of reclaimed asphalt pavement, waste rubber powder, and bagasse fibers, it is meaningful to develop the cooperative utilization of various solid wastes. This paper studied the microstructure and thermal characteristics of bagasse fibers, carried out the mix design of a reclaimed asphalt mixture with bagasse fibers and rubber-modified asphalt, and evaluated its road performance. At the same time, the test road was paved successfully and observed for a time. The results show that the hollow lumen with multilayer fiber structure in bagasse fibers contributes to absorbing free asphalt in mixtures and enhances the adhesion between bagasse fibers and asphalt. The thermal properties of bagasse fibers and lignin fibers are approximately the same. However, in the second stage of thermogravimetric tests, the differential thermogravimetry curve of bagasse fibers shows a double-peak structure, while that of lignin fibers reveals a single-peak structure. After adding bagasse fibers, the dynamic stability value of the rubber-asphalt recycled mixture increases by 24.6%, and the failure strain value of the bending test at low temperatures increases by 19.3%. The immersion Marshall residual stability and the freeze-thaw splitting residual strength ratios increase by 4.7% and 8.6%, respectively. The paved test road is in good condition as well. Overall, bagasse fibers have a certain role in improving the road performance of reclaimed asphalt mixtures with rubber-modified asphalt, mainly by promoting the anti-deformability of mixtures, enhancing the skeleton action of aggregates, and increasing the structural strength and toughness of mixtures.

Keywords: road engineering; reclaimed asphalt mixture; rubber-modified asphalt; bagasse fibers; road performance

收稿日期:2023-03-12

基金项目:南宁市重点研发计划项目(编号:20223039);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号:X202220510435);长安大学大学生创新创业训练项目(编号:S202210710146)

作者简介:蒋鑫,男,硕士,高级工程师.E-mail:xinjiang202208@sina.com

0 引言

中国早期修建的沥青路面已经步入维修养护期,维修改造产生的大量沥青路面旧料处理成为一项难题^[1]。针对回收沥青混合料的再生利用,国内外学者开展了大量研究,探索了材料组成^[2-7]、再生工艺^[8-9]等对再生沥青混合料路用性能的影响,认为再生沥青混合料的高温稳定性良好,但低温抗裂、耐疲劳、抗水损害性能略显不足,而添加适量的纤维能在一定程度上弥补上述缺陷,使混合料表现出较为优异的路用性能^[10-15]。

蔗渣,作为制糖工业的废料,具有来源集中、存量 大、纤维产出率高等优势,是理想的植物纤维原料,可制备出蔗渣纤维,探索蔗渣纤维的高质、高效、规模化利用已上升为国家发展战略^[16]。Mansor等^[17]将蔗渣纤维应用于SMA沥青混合料中,发现蔗渣纤维能显著改善混合料的高温稳定性,提高混合料的动态模量值,有效地抑制路面泛油病害;李祖仲等^[18-20]对蔗渣纤维的物质组成及其沥青胶浆、混合料的技术性能开展了系统研究,得出蔗渣纤维在材料组成上同木质素纤维基本相似,其吸油率略低于木质素纤维,但满足规范要求。在相同的纤维掺量下,蔗渣纤维沥青混合料与木质素纤维沥青混合料的路用性能基本接近,能大幅度提升混合料的高温稳定性和低温抗裂性能。至于废旧橡胶粉改性沥青,在沥青路面中已广泛应用^[21],已有学者将纤维掺入到橡胶沥青或橡胶沥青混合料中,进一步改善胶浆或混合料的高低温性能和抗疲劳性能^[22-23]。基于此,为了实现回收沥青混合料、废旧胶粉改性沥青、蔗渣纤维多种固废协同利用,通过探究蔗渣纤维的微观结构及热特性,开展掺蔗渣纤维的橡胶沥青再生混合料配合比设计,评价其高温稳定性、低温抗裂性及水稳定性等路用性能,并铺筑试验路,观测其长期性能,为蔗渣纤维、胶粉改性沥青在再生沥青混合料中的应用提供试验参考。

1 试验

1.1 原材料

1.1.1 蔗渣纤维技术性能

采用课题组研制的蔗渣纤维制备设备,见图1,制备路用蔗渣纤维。依据《沥青路面用纤维》(JT/T

533—2020),对蔗渣纤维技术性能进行测试,试验结果见表1。



图1 蔗渣纤维制备设备

Figure 1 Preparation equipment of bagasse fiber

表1 蔗渣纤维技术性能

Table 1 Technical properties of bagasse fiber

测试项目	单位	测试结果	技术要求
0.15 mm 质量通过率	%	72.1	60~80
灰分含量	%	16.4	13~23
pH		6.6	6.5~8.5
吸油率	倍	7.6	5~9
含水率	%	3.6	≤5
质量损失(210 ℃,1 h)	%	4.1	≤6,且无燃烧
最大长度	mm	6.0	≤6
平均长度	mm	4.3	实测
密度	g/cm ³	1.513	实测

1.1.2 RAP基本技术性能

采用市政沥青路面回收料(RAP),经破碎预处理,RAP中旧矿料级配、旧沥青的技术指标均满足《公路沥青路面再生技术规范》(JTG/T 5521—2019)要求。考虑到RAP细料对再生沥青混合料的性能有较大影响,为严格控制再生集料的变异性 and 优化矿料级配,将RAP按照粒径大小分成2档料,即再生料1(0~6 mm)和再生料2(6~11 mm),经抽提试验后筛分,结果见表2。

表2 RAP中旧集料筛分试验结果

Table 2 Results of recycled aggregate screening test in RAP

RAP料 类型	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
再生料1 (0~6 mm)	100	100	100	98.0	55.3	20.3	8.5	3.5	1.1	0.5
再生料2(6~ 11 mm)	100	98.6	78.1	2.5	0	0	0	0	0	0

1.1.3 橡胶沥青

采用 SK 牌 A 级 90[#] 基质沥青和 30 目橡胶粉,制备橡胶粉改性沥青,作为再生混合料的黏结材料,其

中胶粉掺量为 20%,增溶助剂掺量为 2%,依据《橡胶沥青路面技术标准》(CJJ/T 273—2019)测试其基本路用性能,结果见表 3。

表 3 橡胶改性沥青基本技术性能
Table 3 Basic technical properties of rubber-modified asphalt

项目	针入度/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	5℃延度/ cm	旋转黏度 (135℃)/(Pa·s)	闪点/ ℃	离析/ ℃	TFOT 后 针入度比/%
试验结果	64	62.5	20.6	2.7	248	1.4	63
规范要求	50~70	≥55	≥15	≤3	≥230	≤3	≥60

1.1.4 新集料

依据试验规程,对新集料及矿粉的基本技术指标进行测试,试验结果见表 4、5,其中新集料材质为辉绿岩,矿粉材质为石灰岩。

表 4 集料技术性能
Table 4 Technical performances of aggregates

集料粒径/mm	吸水率/%	表观密度/(g·cm ⁻³)	针片状含量/%
10~20	1.048	2.672	8.7
5~10	1.268	2.653	10.4
3~5	1.349	2.660	9.5
0~3	1.403	2.523	—

表 5 矿粉技术性能
Table 5 Technical performances of mineral powder

性能指标	单位	试验结果	规范要求
视密度	g/cm ³	2.78	≥2.5
含水率	%	0.31	≤1.0
外观		无团粒结块	无团粒结块

1.1.5 再生剂

采用 RA-1 型再生剂,基本技术性能见表 6。

表 6 再生剂基本技术性能
Table 6 Basic technical performances of rejuvenator

测试项目	单位	实测结果	技术要求
60℃黏度/	mm ² /s	130.0	50~175
密度(15℃)	g/cm ³	1.085	实测
闪点	℃	240	≥220
外观		红褐色	实测
饱和分	%	28.1	≤30
芳香分	%	28.5	实测

1.2 试验方法

1.2.1 扫描电镜分析

采用 S4800 扫描电镜观测蔗渣纤维表面形貌。

将蔗渣纤维样品镀上 10 nm 的喷金层后,在 5 kV 的测试电压下,观测并采集蔗渣纤维微观形貌图像。

1.2.2 热重分析

采用 TGA SDT Q600 热重分析仪对蔗渣纤维进行热稳定性分析,木质素纤维作为参照对比。测试温度范围为 30~650℃,升温速度为 10℃/min,整个测试过程在氮气环境下进行。

1.2.3 路用性能测试方法

进行掺蔗渣纤维的橡胶沥青再生混合料配合比设计,并依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011),分别采用高温车辙、低温弯曲破坏、浸水马歇尔及冻融劈裂试验评价混合料的高、低温和水稳定性能。

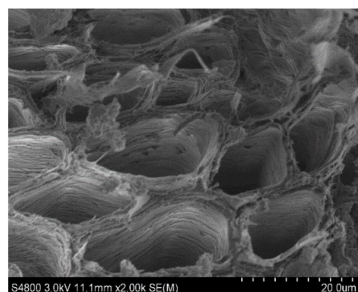
2 结果与讨论

2.1 蔗渣纤维微观结构

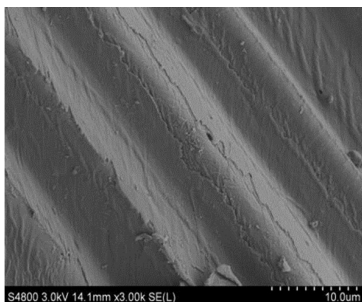
纤维的微表构造是影响其在沥青混合料中增强效果的关键因素之一。图 2 为蔗渣纤维扫描电镜图像。可以看出:蔗渣纤维横向断面表现为不规则的多层壁空腔管腔结构,多根空心微管相并成束,形成捆绑式构造。蔗渣纤维纵向表面为等距平行排列的波纹状结构。这些结构特征有利于蔗渣纤维吸附自由沥青,减少沥青析漏,增强蔗渣纤维与沥青之间的黏附性。

2.2 蔗渣纤维热特性

图 3 为两种纤维的热重试验结果,两种纤维的热重曲线基本一致。热失重过程大致划分为 3 个阶段。第一个阶段(30~106℃),蔗渣纤维与木质素纤维发生的质量损失主要与纤维自身游离水、物理吸附水和分子中结晶水的蒸发有关,质量损失皆为 5% 左



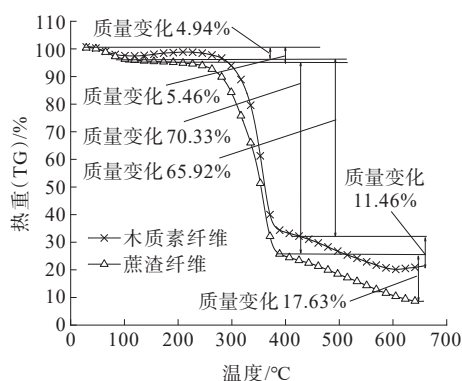
(a) 横向断面



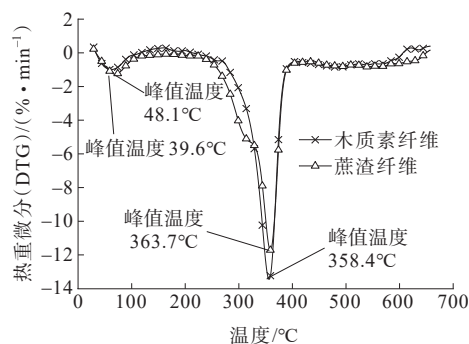
(b) 纵向断面

图2 蔗渣纤维微观形貌

Figure 2 Micromorphology of bagasse fiber



(a) 蔗渣纤维和木质素纤维的TG曲线



(b) 蔗渣纤维和木质素纤维的DTG曲线

图3 蔗渣纤维和木质素纤维的热分析曲线

Figure 3 Thermal analysis curves of bagasse fiber and lignin fiber

右;第二阶段(250.3~391.6℃),蔗渣纤维质量损失比木质素纤维质量损失多4.41%,并且在该阶段蔗渣纤维的DTG曲线出现了双峰结构。这是因为蔗渣纤维中半纤维素的相对含量较高,在该阶段主峰区间主要是纤维素和木质素的分解,副峰区间主要是半纤维素的降解。木质素纤维的半纤维素相对含量较低,因而在此阶段的微商热重曲线表现为单峰形状,且热重损失也略少于蔗渣纤维;最后一个阶段(392.0~650.0℃),质量损失的原因是纤维有机成分的热缩反应,随着试验温度的继续升高,具有芳香环结构的自由基片段发生脱氧缩聚反应,芳香环之间的热缩聚反应只析出氢,因此此阶段质量损失速率较小。

2.3 混合料配合比设计

2.3.1 矿料级配设计

针对橡胶改性沥青,已有研究表明,骨架密实型矿料级配混合料具有更好的路用性能^[21]。依据《橡胶沥青路面技术标准》(CJJ/T 273—2019),以骨架密实型 ARHM-SD-13 作为设计级配类型,其中 RAP、再生剂和蔗渣纤维掺量分别为 20%、12% (占新沥青质量百分比) 和 0.3% 进行混合料配合比设计,矿料配比见表 7,级配曲线见图 4,设计了 3 种矿料级配,其中级配 2 更加贴近级配中值,选为最佳合成矿料级配,矿料组成为:矿料(0~3 mm):矿料(3~6 mm):矿料(6~11 mm):矿料(11~16 mm):再生料 1(0~6 mm):再生料 2(6~11 mm):矿粉=12:5:30:28:5:15:5。再生料 1 与再生料 2 按照质量比 1:3 混合,测定再生料的油石比为 4.0%。

2.3.2 最佳油石比确定

选取 3.5%、4.0%、4.5%、5.0%、5.5% 共 5 个油石比制备马歇尔试件,双面击实 75 次,测试结果如表 8 所示,其中黏结料包括橡胶沥青、再生剂及再生料中的旧沥青。对空隙率 R_{VV} 、矿料间隙率 R_{VMA} 、压实沥青混合料的粗骨料骨架间隙率 $R_{VCA,mix}$ 、捣实状态下的粗集料松装间隙率 $R_{VCA,DRC}$ 随油石比变化情况进行绘图,如图 5 所示。

选取 4.5% 为目标空隙率,在空隙率图表上找到相应油石比 5% 作为最佳油石比 R_{OAC} ,经验证 $R_{OAC}=5.0\%$,满足《橡胶沥青路面技术标准》(CJJ/T 273—2019) 中的技术要求: $R_{VCA,DRC}-R_{VCA,mix}=1\sim 1.5$, $R_{VMA}\geq 18\%$ 。

表 7 ARHM-SD-13 型沥青混合料矿料级配

Table 7 Mineral aggregate gradation of ARHM-SD-13 asphalt mixture

级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
规范上限	100	100	75	30	22	16	12	9.5	8	6
规范下限	100	90	50	18	10	6	4	2	1	0
中值	100	95	62.5	24	16	11	8	5.8	4.5	3
矿料	0~3 mm	100	100	98.7	89	72.7	45.7	22.7	11.9	5.9
	3~6 mm	100	100	100	79.8	2.3	0	0	0	0
	6~11 mm	100	100	85.9	1.2	0	0	0	0	0
	11~16 mm	100	90	12	0	0	0	0	0	0
矿粉	100	100	100	100	100	100	100	100	98.3	81.0
合成级配 1	100	97.3	70.5	29.4	20.2	15.3	11.2	8.0	6.4	4.8
合成级配 2	100	97.0	67.8	26.5	18.6	14.7	10.9	7.9	6.4	4.8
合成级配 3	100	97.5	72.0	29.4	20.2	15.3	11.2	8.0	6.4	4.8

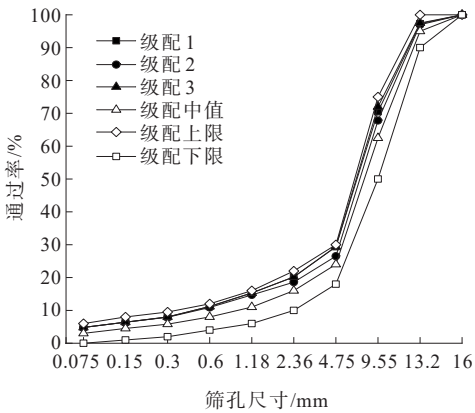


图 4 矿料合成级配曲线

Figure 4 Curves of aggregate synthetic gradation

2.4 混合料路用性能

2.4.1 高温稳定性

采用车辙试验,对上述设计的掺蔗渣纤维 ARHM-SD-13 橡胶沥青再生混合料的高温稳定性进

行评价,并与未掺纤维、同掺量木质素纤维的混合料进行比较,试验结果见表 9。

由表 9 可知:骨架密实型橡胶沥青再生混合料高温稳定性能良好,动稳定度值高于规范要求值,掺加蔗渣纤维、木质素纤维后,其动稳定度值分别提高了约 24.6%、22.4%,可见,纤维对于改善橡胶沥青再生混合料的高温稳定性能有一定的功效,车辙试验总变形也明显减小。究其缘由:① 纤维吸附部分自由沥青,提高了纤维沥青胶浆的高温抗变形能力,增强了纤维沥青胶浆与集料之间的黏结力,减少了集料间的相对滑移、推挤等形变;② 纤维在沥青胶浆中形成三维网状结构,其桥接作用也增强了集料的骨架结构,提高了混合料整体结构强度。此外,蔗渣纤维对橡胶沥青再生混合料的高温稳定性能改善效果略好于木质素纤维,这主要与两种植物纤维的技术特性有关^[19]。蔗渣纤维为多层壁纤维构造的中空管状

表 8 马歇尔试验结果汇总表

Table 8 Results of Marshall test

项目	油石比/%	$\gamma_r/(g \cdot cm^{-3})$	$R_{VCA,mix}/\%$	$R_{VCA,DRC}/\%$	$R_{VV}/\%$	$R_{VMA}/\%$
ARHM-SD-13	3.5	2.429	40.0	41.0	5.6	18.4
	4.0	2.454	39.8	41.0	5.2	18.4
	4.5	2.475	39.8	41.0	4.8	18.3
	5.0	2.468	39.6	41.0	4.5	18.3
	5.5	2.442	39.5	41.0	4.1	18.2
规范要求	—	—	$<R_{VCA,DRC}$	—	4~6	≥ 18.0

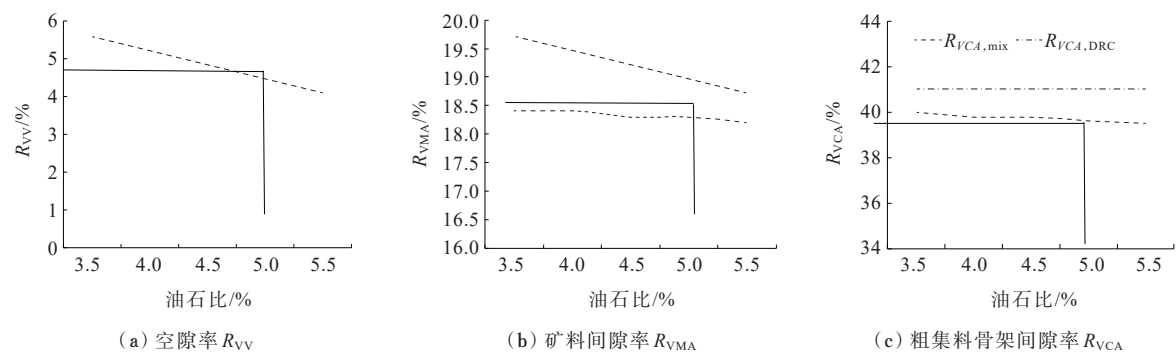


图 5 各技术参数随油石比的变化图

Figure 5 Variation of technical parameters with oil-stone ratio

表 9 车辙试验结果

Table 9 Results of rutting test

混合料类型	动稳定度/(次·mm ⁻¹)		总变形/mm
	测试值	技术要求	
未掺纤维	3 419	≥3 000	1.9
掺蔗渣纤维	4 260		1.5
掺木质素纤维	4 185		1.6

结构,其宏观尺寸、长径比、单根纤维拉伸强度均大于木质素纤维,长径比越大且单根纤维拉伸强度越高的纤维,其空间交织形成的网络结构对混合料高温性能的改善效果越显著。

2.4.2 低温抗裂性

采用低温弯曲破坏试验,对上述设计的掺蔗渣纤维 ARHM-SD-13 橡胶沥青混合料的低温抗裂性能进行评价,并与未掺纤维、同掺量木质素纤维的混合料进行对比,试验结果见表 10。

表 10 低温弯曲破坏试验结果

Table 10 Results of bending test under low temperature

混合料类型	弯曲试验破坏应变/ $\mu\epsilon$	技术要求/ $\mu\epsilon$
未掺纤维	2 850	≥2 800
掺蔗渣纤维	3 401	
掺木质素纤维	3 423	

由表 10 可知:橡胶沥青再生混合料的弯曲试验破坏应变略高于规范要求值,掺加蔗渣纤维、木质素纤维后,其弯曲破坏应变值分别提高了约 19.3%、20.1%,表明纤维能改善混合料的低温柔韧性。在沥青混合料中,纤维能阻挡裂缝的形成及延伸,在一定程度上增加了再生沥青混合料的抗弯拉强度及劲度模量,提高了混合料的韧性,因此,其破坏应变也随之增大,在形变过程中,纤维的滑移、拔出或断裂需

消耗更多的能量,从而发挥出更强的低温抗形变能力和阻裂效果。

2.4.3 水稳定性

分别采用浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验,对上述设计的掺蔗渣纤维 ARHM-SD-13 橡胶沥青混合料的水稳定性进行评价,并与未掺纤维、同掺量木质素纤维的混合料进行对比,试验结果见表 11。

表 11 水稳定性试验结果

Table 11 Results of water stability test

混合料类型	浸水马歇尔试验	冻融劈裂残留
	残留稳定度/%	强度比/%
未掺纤维	86	81
掺蔗渣纤维	90	88
掺木质素纤维	89	87
技术要求	≥85	≥80

由表 11 可知:橡胶沥青再生混合料的浸水马歇尔残留稳定度、冻融劈裂残留强度比均略高于规范要求值,相对而言,再生料骨料与橡胶沥青的界面黏结能力要弱于新集料,因此,再生料对混合料抗水损害性能的影响较敏感,掺入适量纤维非常必要。掺加蔗渣纤维、木质素纤维后,混合料的浸水马歇尔残留稳定度和冻融劈裂残留强度比分别提高了约 4.7%、3.5% 和 8.6%、7.4%,表明纤维对改善混合料的水稳定性起到一定的作用。

2.5 试验段铺装与工后观测

为了进一步对上述设计的蔗渣纤维橡胶沥青再生混合料的路用性能进行论证,将其作为沥青路面上面层材料,铺筑试验段,观测其使用效果,如图 6 所示。经过 3 年多的使用观测,掺蔗渣纤维橡胶沥青再生路面未出现裂缝、坑槽、车辙等病害,使用效果良好。



图6 试验段路面摊铺、碾压及3年后现场观测

Figure6 Paving and rolling of test section and field observation after 3 years

3 结论

(1) 蔗渣纤维具有多层壁空芯管腔结构,多根空心纤维微管相并成束,形成捆绑式构造,有利于吸附混合料中自由沥青,减少沥青路面泛油病害,增强了蔗渣纤维与沥青之间的黏附性。此外,蔗渣纤维与木质素纤维热重曲线基本一致,但在热失重的第二阶段,两者的微商热重曲线略有差异,蔗渣纤维呈现双峰结构,木质素纤维表现为单峰形状。

(2) 设计出骨架密实型蔗渣纤维橡胶沥青再生混合料,矿料组成为:(0~3 mm):(3~6 mm):(6~11 mm):(11~16 mm):再生料1:再生料2:矿粉=12:5:30:28:5:15:5,最佳油石比为5.0%,各项技术指标满足规范要求。

(3) 掺加蔗渣纤维后,橡胶沥青再生混合料动稳定度提高了约24.6%,低温弯曲破坏应变提高了约19.3%,浸水马歇尔残留稳定度和冻融劈裂残留强度比分别提高了约4.7%、8.6%,可见,蔗渣纤维对于改善橡胶沥青再生混合料的路用性能有一定的功效,后续可在不同交通状况、不同气候环境的地区铺筑更多的试验路,持续观测其使用性能。

参考文献:

References:

- [1] 徐金枝,郝培文,郭晓刚,等.厂拌热再生沥青混合料组成设计方法综述[J].中国公路学报,2021,34(10):72-88.
XU Jinzhi,HAO Peiwen,GUO Xiaogang,et al.Review of mix design method of hot in-plant recycled asphalt mixture[J].China Journal of Highway and Transport,2021,34(10):72-88.
- [2] 王明刚,孙静.再生沥青混合料路用性能研究[J].中外公路,2019,39(1):270-274.
WANG Minggang,SUN Jing.Study on road performance of recycled asphalt mixture[J].Journal of China & Foreign Highway,2019,39(1):270-274.
- [3] 左锋,叶奋,宋卿卿.RAP 掺量对再生沥青混合料路用性能影响[J].吉林大学学报(工学版),2020,50(4):1403-1410.
ZUO Feng, YE Fen, SONG Qingqing. Influence of RAP content on road performance of recycled asphalt mixture [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2020,50(4):1403-1410.
- [4] 余晖,郑炳锋,黄毅,等.泡沫温拌再生沥青混合料力学性能研究[J].中外公路,2021,41(4):277-281.
YU Hui,ZHENG Bingfeng,HUANG Yi,et al.Research on mechanical property of foamed warm mix asphalt containing RAP[J].Journal of China & Foreign Highway, 2021,41(4):277-281.
- [5] 孙良钰,王盟,张喜伦,等.高RAP掺量沥青混合料疲劳预估模型研究[J].中外公路,2022,42(3):195-201.
SUN Liangyu,WANG Meng,ZHANG Xilun,et al.Study on fatigue prediction model of asphalt mixture with high RAP content[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022,42(3):195-201.
- [6] 李小斌.再生胶/SBS复合改性沥青再生混凝土抗开裂性能评价[J].中外公路,2023,43(1):221-226.
LI Xiaobin. Evaluation of anti-cracking performance of recycled asphalt concrete with recycled rubber/sbs composite modified asphalt[J].Journal of China & Foreign Highway,2023,43(1):221-226.
- [7] 王菲菲,姜风华.沥青等级对废弃混凝土粗骨料(RCA)热再生沥青混合料性能的影响[J].中外公路,2022,42(5):208-215.
WANG Feifei,JIANG Fenghua.Influence of asphalt grade on performance of waste concrete coarse aggregate(RCA) hot recycled asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(5):208-215.
- [8] 王雪莲,胡林,黄晓明.沥青路面厂拌热再生工艺关键技术研究[J].中外公路,2019,39(1):210-214.
WANG Xuelian, HU Lin, HUANG Xiaoming. Key technology of hot recycling process for plant-mixed asphalt pavement[J].Journal of China & Foreign Highway, 2019,39(1):210-214.
- [9] 李正中,田克,柴东然,等.不同热再生拌和工艺对混合料再生效果的影响研究[J].中外公路,2019,39(2):227-231.
LI Zhengzhong, TIAN Ke, CHAI Dongran, et al. Study on the influence of different mixing process with thermal regeneration on mixture regeneration[J]. Journal of China & Foreign Highway,2019,39(2):227-231.
- [10] 周刚,王庆,孙潜,等.聚酯纤维温拌再生沥青混合料性能及压实温度研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(6):55-60.

- ZHOU Gang, WANG Qing, SUN Qian, et al. Study on performance and compaction temperature of polyester fiber warm mixed recycled asphalt mixture[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2019, 38(6): 55-60.
- [11] 王瑛, 刘洪辉. 基于正交试验的聚酯纤维再生沥青混合料路用性能研究[J]. 公路, 2019, 64(10): 18-23.
- WANG Ying, LIU Honghui. Study on pavement performance of polyester fiber recycled asphalt mixture based on orthogonal test[J]. Highway, 2019, 64(10): 18-23.
- [12] WU Z G, ZHANG C, XIAO P, et al. Performance characterization of hot mix asphalt with high RAP content and basalt fiber[J]. Materials, 2020, 13(14): 3145.
- [13] 王玉林, 卢东, 徐宁. 木质素纤维对再生透水沥青混合料路用性能研究[J]. 公路, 2021, 66(2): 52-56.
- WANG Yulin, LU Dong, XU Ning. Effect of lignin fiber on the road performance of recycled pervious asphalt mixtures[J]. Highway, 2021, 66(2): 52-56.
- [14] 张荣, 王彬. 复掺芳纶纤维和玻璃纤维再生沥青混合料路用性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(8): 2794-2802.
- ZHANG Rong, WANG Bin. Influences of aramid fiber and glass fiber on road performance of recycled asphalt mixture[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(8): 2794-2802.
- [15] PASCHE E, BRUSCHI G J, SPECHT L P, et al. Fiber-reinforcement effect on the mechanical behavior of reclaimed asphalt pavement - powdered rock - Portland cement mixtures [J]. Transportation Engineering, 2022, 9: 100121.
- [16] 王梦梦, 李祖仲, 庞萧萧, 等. 蔗渣纤维应用研究进展[J]. 应用化工, 2020, 49(12): 3132-3136.
- WANG Mengmeng, LI Zuzhong, PANG Xiaoxiao, et al. Research progress on application of bagasse fibers[J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(12): 3132-3136.
- [17] MANSOR S, ZAINUDDIN N I, AZIZ N A, et al. Sugarcane bagasse fiber-an ecofriendly pavement of SMA[C]. AIP Conference Proceedings 2020: 020032.
- [18] LI Z Z, ZHANG X L, FA C G, et al. Investigation on characteristics and properties of bagasse fibers: Performances of asphalt mixtures with bagasse fibers[J]. Construction and Building Materials, 2020, 248(6): 118648.
- [19] LI Z Z, LI K, CHEN W X, et al. Investigation on the characteristics and effect of plant fibers on the properties of asphalt binders[J]. Construction and Building Materials, 2022, 338: 127652.
- [20] 李祖仲, 李梦园, 刘卫东, 等. 蔗渣纤维表面改性及其沥青混合料路用性能[J/OL]. 吉林大学学报(工学版), 1-9 [2023-01-04]. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20220870>.
- LI Zuzhong, LI Mengyuan, LIU Weidong, et al. Study on surface modification of bagasse fibers and road performances of asphalt mixture[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 1-9 [2023-01-04]. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20220870>.
- [21] 马涛, 陈葱琳, 张阳, 等. 胶粉应用于沥青改性技术的发展综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 1-16.
- MA Tao, CHEN Conglin, ZHANG Yang, et al. Development of using crumb rubber in asphalt modification: A review[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(10): 1-16.
- [22] 唐芳. 木质素纤维与橡胶沥青复合改性高RAP掺量温拌再生混合料路用性能与耐久性研究[J]. 公路, 2017, 62(10): 201-207.
- TANG Fang. Study on road performance and durability of lignin fiber and rubber asphalt composite modified with high rap content of warm mixture[J]. Highway, 2017, (10): 201-207.
- [23] 展宏图, 柳力. 玄武岩纤维/橡胶复合改性沥青胶浆路用性能研究[J]. 中外公路, 2020, 40(1): 253-257.
- ZHAN Hongtu, LIU Li. Study on pavement performance of basalt fiber/rubber compound modified asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(1): 253-257.