

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.06.014

## 玄武岩纤维沥青混合料薄层罩面性能研究\*

张四恒<sup>1</sup>, 邵景干<sup>2,3</sup>, 李文凯<sup>2,3</sup>

(1.河南交通投资集团有限公司, 河南 郑州 450016; 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:** 现有沥青混合料薄层罩面工艺存在高温抗车辙、低温抗开裂、抗水损害及抗飞散等性能不足的问题。文中将长度 3 mm、直径 17  $\mu\text{m}$  和长度 6 mm、直径 17  $\mu\text{m}$  两种不同规格的玄武岩纤维应用到薄层罩面设计中, 以改善其路用性能。对不同规格、不同掺量的玄武岩纤维选用 AC-10C、SMA-10 两种矿料级配进行配合比设计, 并通过车辙试验、单轴贯入试验、低温小梁弯曲试验、浸水马歇尔试验、飞散损失试验评价其路用性能。结果表明, 长度 6 mm、直径 17  $\mu\text{m}$  玄武岩纤维对两种沥青混合料高温稳定性、低温抗裂性、抗水损害性能的改善效果较优, 长度 3 mm、直径 17  $\mu\text{m}$  玄武岩纤维对两种沥青混合料水稳定性、抗飞散性能的改善效果较优; 从整体路用性能考虑, 玄武岩纤维 AC-10C、SMA-10 沥青混合料中纤维最佳掺量分别为 0.3%、0.4%。

**关键词:** 公路; 薄层罩面; 玄武岩纤维; 沥青混合料; 矿料级配; 油石比; 路用性能

**中图分类号:** U416.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2023)06-0073-06

目前, 中国公路建设重心已从以建设为主转变为建养并施, 随着大中修里程的逐年增加, 养护资金紧缺给公路建养部门带来很大压力。不同沥青路面病害形式有较大差异, 选择合理的检查设备、科学的分析方法、针对性的养护措施是实现资源合理配置的必要条件。亟须养护的沥青路面大多整体结构层完整, 服务水平及服务质量严重退化, 而抗滑能力及平整度的退化较隐蔽。

薄层罩面是一种预防或局部矫正路面轻微病害的施工技术, 铺筑厚度为 15~25 mm, 具有施工周期短、成本低等优点, 能改善路表抗滑能力, 修复表层裂缝, 提高路面服务水平, 延长路面使用年限。薄层罩面作为沥青路面路表结构层, 直接承受外界环境及车辆轴载的综合作用, 其设计方法及施工工艺对路用性能有较大影响。目前的薄层罩面设计理念已无法满足高品质路面工程性能的要求, 须寻求一种综合性能优良的薄层罩面类型。玄武岩纤维由玄武岩高温熔融并通过一定的工艺拉丝而成, 其物理、力学性能好, 易均匀分散在混合料中起到吸附沥青、稳定沥青的作用<sup>[1-2]</sup>。相关研究发现, 将玄武岩纤维掺入沥青混合料中, 能有效改善沥青路面的高温、抗疲劳及抗水损害等路用性能。Hao M. H. 等研究发现, 最佳玄武岩纤维掺量下, 沥青混合料高温

抗车辙、低温抗开裂及疲劳性能较普通混合料分别提高 1.60 倍、1.25 倍、2.00 倍<sup>[3]</sup>。Fan W. X. 等对不同种类纤维沥青混合料的路用性能进行研究, 发现玄武岩纤维对混合料整体性能的改善最优, 木质素纤维次之, 聚酯纤维最差<sup>[4]</sup>。杨盼盼将玄武岩纤维掺入 SMA、SUP 矿料级配混合料中进行疲劳性能试验, 发现玄武岩纤维能有效改性沥青路面的抗疲劳开裂性能<sup>[5]</sup>。范钊通过单轴贯入、浸水马歇尔及低温小梁弯曲试验对玄武岩纤维沥青路面性能展开研究, 发现在最佳玄武岩纤维掺量下, 沥青路面的高温抗车辙、低温抗开裂性能改善显著, 但水稳定性提升效果一般<sup>[6]</sup>。穆岩对玄武岩纤维沥青混合料进行配合比设计及相关性能研究, 得出玄武岩纤维的最佳掺量为 0.3%。本文对不同长度、不同掺量(占混合料质量)玄武岩纤维的 AC-10C、SMA-10 两种矿料级配薄层罩面进行配合比设计及高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性、抗飞散性能研究, 为玄武岩纤维在薄层罩面养护工程中的应用提供理论基础。

## 1 原材料

### 1.1 沥青

选用中油燃料油股份有限公司生产的 SBS I-D 聚合物改性沥青, 其主要技术指标见表 1。

\* 基金项目: 2021 年交通运输部重点科技项目清单(2021-TG-001); 河南省交通运输科技计划项目(2021J5)

表 1 SBS I-D 聚合物改性沥青的主要技术指标

检测项目	技术要求	检测结果
针入度(25 ℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	40~60	48
软化点/℃	≥60	64.5
延度(5 cm/min)/cm	≥20	34
135 ℃运动黏度/(Pa·s)	≤3	0.58
弹性恢复(25 ℃)/%	≥75	86
质量变化/%	±1	-0.28
RTFOT 针入度比(25 ℃)/%	≥65	69
后残留物 延度(5 ℃)/cm	≥15	23

1.2 玄武岩纤维

选用郑州登封电厂集团有限公司生产的玄武岩纤维,规格为长度 3 mm、直径 17 μm 和长度 6 mm、直径 17 μm,其外观见图 1,主要技术指标见表 2。

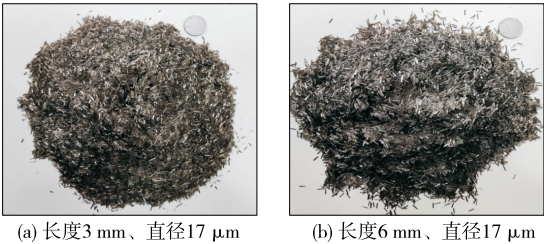


图 1 玄武岩纤维的外观

表 2 玄武岩纤维的主要技术指标

检测项目	技术要求	检测结果
颜色	—	金褐色
纤维长度/mm	—	3/6
纤维直径/μm	—	17
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.6~2.8	2.684
吸水率/%	≤0.20	0.13
断裂强度/MPa	1 200~2 200	1 896
弹性模量/MPa	≥7 500	8 937
断裂伸长率/%	2.4~3.1	2.6
耐热性,断裂强度保留率/%	≥85	92
耐碱性,断裂强度保留率/%	≥75	86

2 配合比设计

选用 AC-10C、SMA-10 两种矿料级配混合料进行研究。玄武岩碎石粗骨料粒径分别为 10~10 mm、5~10 mm、3~5 mm,机制砂细骨料粒径为 0~3 mm,填料为石灰岩磨细的矿粉,其技术指标均符合 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》的要求。两种矿料级配设计结果见表 3,玄武岩纤维不同规格、不同掺量下 AC-10C、SMA-10 薄层罩面沥青混合料马歇尔试验结果见表 4、表 5。

表 3 矿料级配设计

混合料类型	级配类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%							
		9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
AC-10C	上限	100.0	75.0	58.0	44.0	32.0	23.0	16.0	8.0
	下限	90.0	45.0	30.0	20.0	13.0	9.0	6.0	4.0
	目标级配	94.8	60.1	43.6	30.6	21.3	14.7	10.4	5.9
SMA-10	上限	100.0	60.0	32.0	26.0	22.0	18.0	16.0	13.0
	下限	90.0	28.0	20.0	14.0	12.0	10.0	9.0	8.0
	目标级配	95.8	42.1	22.6	18.0	15.2	13.1	11.0	9.8

表 4 玄武岩纤维 AC-10C 沥青混合料马歇尔试验结果

纤维长度/ mm	纤维掺量/ %	最佳油石比/ %	毛体积相对 密度	空隙率/ %	矿料间隙率/ %	沥青饱 和度/%	马歇尔稳定 度/kN	流值/ mm
3	0.0	5.2	2.458	4.6	16.1	76.8	9.76	2.6
	0.2	5.3	2.457	4.4	16.4	77.1	10.21	2.8
	0.3	5.4	2.454	4.3	16.4	77.3	11.76	2.9
	0.4	5.4	2.453	4.3	16.6	77.4	11.31	3.2
	0.5	5.5	2.451	4.2	16.7	77.6	10.56	3.3

续表4

纤维长度/ mm	纤维掺量/ %	最佳油石比/ %	毛体积相对 密度	空隙率/ %	矿料间隙率/ %	沥青饱 和度/%	马歇尔稳定 度/kN	流值/ mm
6	0.2	5.3	2.456	4.5	16.5	77.6	10.38	2.9
	0.3	5.4	2.454	4.3	16.6	77.8	12.08	3.1
	0.4	5.4	2.453	4.3	16.8	77.8	11.67	3.3
	0.5	5.5	2.450	4.1	16.9	78.1	10.89	3.3

表 5 玄武岩纤维 SMA-10 沥青混合料马歇尔试验结果

纤维长度/ mm	纤维掺量/ %	最佳油石比/ %	毛体积相对 密度	空隙率/ %	矿料间隙率/ %	沥青饱 和度/%	马歇尔稳定 度/kN	流值/ mm
—	0.0	6.3	2.447	3.7	18.6	81.3	7.64	3.8
	0.2	6.4	2.445	3.6	18.8	81.5	8.34	4.1
	0.3	6.4	2.443	3.4	19.0	81.7	8.98	4.3
	0.4	6.5	2.442	3.4	19.1	81.7	10.21	4.4
	0.5	6.6	2.440	3.3	19.2	81.9	9.76	4.4
3	0.2	6.5	2.444	3.5	18.9	81.4	8.65	4.3
	0.3	6.6	2.442	3.4	19.2	81.6	9.23	4.4
	0.4	6.6	2.440	3.2	19.3	81.7	10.76	4.5
	0.5	6.7	2.439	3.2	19.3	81.8	10.13	4.6

从表 4、表 5 可以看出:纤维长度相同时,随着纤维掺量的增大,AC-10C、SMA-10 沥青混合料的空隙率、毛体积相对密度逐渐减小,最佳油石比、矿料间隙率、沥青饱和度及流值逐渐增大,马歇尔稳定度先升高后降低;不同纤维长度时,AC-10C 沥青混合料的马歇尔稳定度在纤维掺量为 0.3%时最大,SMA-10 沥青混合料的马歇尔稳定度在纤维掺量为 0.4%时最大。

3 路用性能分析

3.1 高温稳定性

沥青路面是一种柔性结构,对温度较敏感,夏季高温环境下混合料黏韧性降低,塑性增强<sup>[7-8]</sup>。高温稳定性是沥青路面在高温环境下抵抗车辆轴载塑性变形的能力<sup>[9-10]</sup>。车辙、泛油及拥包等路面病害的出现是沥青路面高温稳定性差的主要表现。通过室内车辙试验、高温单轴贯入试验对玄武岩纤维 AC-10C、SMA-10 薄层罩面沥青混合料进行高温稳定性研究,车辙试验温度为 60℃、轮压为 0.7 MPa,贯入试验温度为 60℃、加载速率为 1 mm/min。

3.1.1 车辙试验

车辙试验能够模拟夏季高温环境下沥青路面在车辆轴载作用下出现车辙病害的机理,用动稳定度表征沥青路面的高温抗车辙能力。不同纤维长度、不同纤维掺量时玄武岩纤维 AC-10C、SMA-10 沥青混合料的动稳定度分别见图 2、图 3。

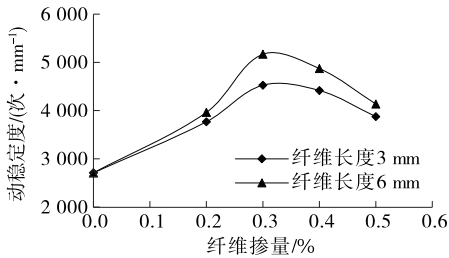


图 2 玄武岩纤维 AC-10C 沥青混合料的动稳定度

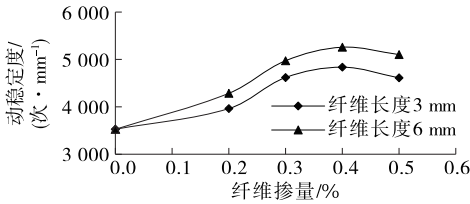


图 3 玄武岩纤维 SMA-10 沥青混合料的动稳定度

由图2、图3可知:相同混合料类型、相同纤维掺量时,随着纤维长度的增加,AC-10C、SMA-10 沥青混合料的动稳定度提高,6 mm 长度玄武岩纤维对沥青混合料高温性能的改善效果优于 3 mm 长度玄武岩纤维;相同混合料类型、相同纤维长度时,随着纤维掺量的增加,AC-10C、SMA-10 沥青混合料的动稳定度呈现先升高后降低的趋势,AC-10C 混合料的动稳定度在纤维掺量为 0.3% 时最优, SMA-10 混合料的动稳定度在纤维掺量为 0.4% 时最优,与稳定度试验结果吻合;相同纤维长度和掺量时, SMA-10 混合料的动稳定度优于 AC-10C 混合料。玄武岩纤维是一种矿物纤维,密度为  $2.687 \text{ g/cm}^3$ ,与玄武岩碎石密度相差不大,在混合料中呈三维乱相分布,不易出现结团、离析现象,在混合料内部起到吸附沥青、稳定沥青的作用,从而增强沥青路面的高温抗塑性变形能力; AC-10C、SMA-10 沥青混合料的公称最大粒径均为 9.5 mm, 6 mm 长度玄武岩纤维分散成束后能更好地握裹、搭接混合料中的粗骨料,增强沥青路面的承载能力; SMA-10 混合料属于间断级配,粗骨料用量较大且在混合料中的嵌挤效果优于 AC-10C 密级配混合料,故相同条件下其高温抗车辙能力较优。

### 3.1.2 单轴贯入试验

采用 SYD-XY150 型沥青混合料旋转压实仪成型直径为 150 mm 的沥青混合料试件,通过 SYD-0730A 型多功能全自动沥青压力试验机进行贯入强度试验模拟高温环境下车辆轴载对沥青路面承载能力的影响,贯入强度计算方法见式(1)。不同玄武岩纤维长度、不同纤维掺量时 AC-10C、SMA-10 沥青混合料的贯入强度分别见图4、图5。

$$R_{\tau} = f_{\tau} \times \sigma_p, \sigma_p = P/A \quad (1)$$

式中:  $R_{\tau}$  为贯入强度(MPa);  $f_{\tau}$  为贯入应力系数,试件直径为 150 mm 时,取值为 0.35;  $\sigma_p$  为贯入应力(MPa);  $P$  为试件破坏时的极限荷载(N);  $A$  为压头截面积( $\text{mm}^2$ )。

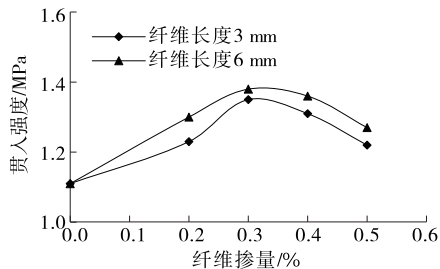


图4 玄武岩纤维 AC-10C 沥青混合料的贯入强度

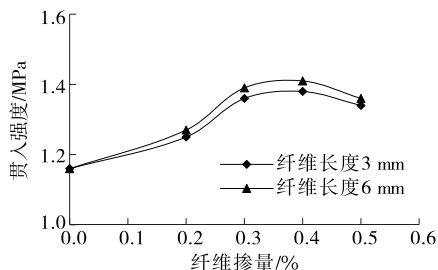


图5 玄武岩纤维 SMA-10 沥青混合料的贯入强度

由图4、图5可知:相同混合料类型、相同纤维掺量时,随着纤维长度的增加,AC-10C、SMA-10 沥青混合料的贯入强度提高,6 mm 长度玄武岩纤维对混合料高温性能的改善效果优于 3 mm 长度玄武岩纤维;相同混合料类型、相同纤维长度时,随着纤维掺量的增加,AC-10C、SMA-10 沥青混合料的贯入强度呈现先升高后降低的趋势, AC-10C 混合料的贯入强度在纤维掺量为 0.3% 时最优, SMA-10 混合料的贯入强度在纤维掺量为 0.4% 时最优;相同纤维长度和掺量时, SMA-10 混合料的贯入强度优于 AC-10C 混合料。玄武岩纤维 AC-10C、SMA-10 沥青混合料的贯入强度变化规律与动稳定度一致。

### 3.2 低温抗裂性

沥青混合料对温度较敏感,冬季气温较低时,混合料抗塑性变形能力降低、脆性增强,在车辆轴载作用下,当混合料内部允许拉应力小于温缩应力时会发生开裂。裂缝在冬春季节交替时更容易出现,裂缝、块状裂缝甚至龟裂等路面病害的出现是沥青路面低温抗开裂能力不足的主要表现<sup>[11-13]</sup>。通过室内-10℃低温小梁弯曲试验评价玄武岩纤维沥青混合料的低温抗裂能力,加载速率为 50 mm/min。不同玄武岩纤维长度、不同纤维掺量时 AC-10C、SMA-10 沥青混合料的弯曲破坏应变分别见图6和图7。

由图6和图7可知:相同试验条件下,玄武岩纤维

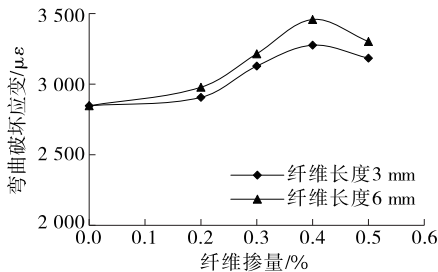


图6 玄武岩纤维 AC-10C 沥青混合料的弯曲破坏应变

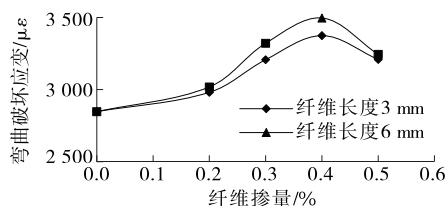


图7 玄武岩纤维 SMA-10 沥青混合料的弯曲破坏应变

维 AC-10C、SMA-10 沥青混合料的弯曲破坏应变相近,表明级配类型对混合料低温抗开裂能力的影响不大。相同混合料类型、相同纤维掺量时,随着纤维长度的增加,AC-10C、SMA-10 沥青混合料的弯曲破坏应变提高,6 mm 长度玄武岩纤维对混合料低温抗裂性的改善效果优于 3 mm 长度玄武岩纤维。这主要是由于 AC-10C、SMA-10 沥青混合料的公称最大粒径均为 9.5 mm,6 mm 长度玄武岩纤维分散成束后能更好地握裹混合料中的粗骨料,并在裂缝处进行搭接,能有效阻止荷载作用下裂缝的进一步扩展。相同混合料类型、相同纤维长度时,随着纤维掺量的增大,AC-10C、SMA-10 沥青混合料的弯曲破坏应变呈现先升高后降低的趋势,在纤维掺量为 0.4% 时最优。

### 3.3 水稳定性

夏季多雨地区,水损害是最常见的路面病害形式。路表面积水如不能及时排出,会渗透到混合料内部孔隙中,车辆荷载作用下在结构层内部形成动水压力,侵蚀路面结构层,降低沥青黏附能力,沥青胶浆极易从骨料之间剥落。松散、露骨等路面病害的出现是水稳定性差的主要表现<sup>[14-15]</sup>。通过浸水马歇尔试验评价玄武岩纤维沥青混合料的抗水损害能力。不同玄武岩纤维长度、不同纤维掺量时 AC-10C、SMA-10 沥青混合料的浸水马歇尔残留稳定度分别见图 8、图 9。

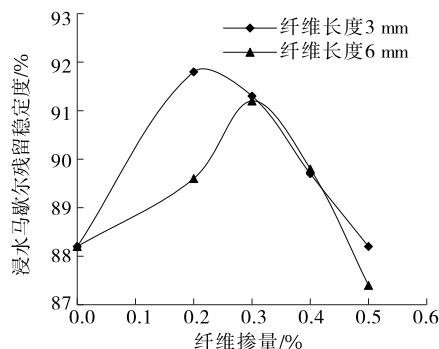


图8 玄武岩纤维 AC-10C 沥青混合料的浸水马歇尔残留稳定度

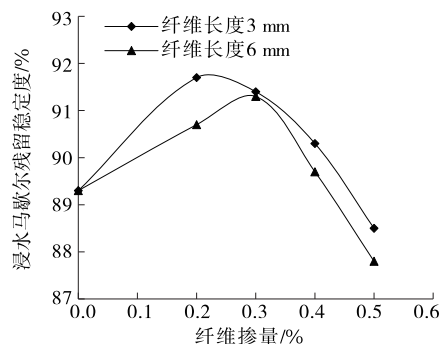


图9 玄武岩纤维 SMA-10 沥青混合料的浸水马歇尔残留稳定度

由图 8、图 9 可知:相同混合料类型、相同纤维掺量时,随着纤维长度的增加,AC-10C、SMA-10 沥青混合料的浸水马歇尔残留稳定度减小,3 mm 长度玄武岩纤维对混合料水稳定性的改善效果优于 6 mm 长度玄武岩纤维。相同混合料类型、相同纤维长度时,随着纤维掺量的增加,AC-10C、SMA-10 沥青混合料的浸水马歇尔残留稳定度呈现先升高后降低的趋势,在纤维掺量为 0.2% 时最优。这主要是由于玄武岩纤维呈束状分散后能均匀分散到混合料中,起到吸附沥青、稳定沥青的作用,使沥青胶浆更加稳定,沥青不易从骨料之间剥落。但纤维掺量过高时,因纤维具有较强的吸附沥青的能力,沥青用量一定时会导致骨料表面的结构沥青膜厚度减小,混合料的抗水损害能力降低。

### 3.4 抗飞散性能

抗飞散性能是沥青路面在雨水冲刷及车辆荷载作用下路表骨料抗剥落松散的能力。薄层罩面作为沥青路面路表结构层,长期直接承受雨水、紫外线、车辆荷载及冻融循环的综合作用,随着使用年限的增加,沥青逐渐老化,沥青胶浆抗剥落能力衰退,在车辆荷载作用下易出现骨料剥离、掉粒、飞散现象,最终形成坑槽病害<sup>[16-18]</sup>。因此,对薄层罩面进行抗飞散性能研究至关重要。通过 DM-II 型洛杉矶磨耗式磨损试验机对玄武岩纤维沥青混合料进行飞散损失试验,以飞散质量损失评价其抗飞散性能。不同玄武岩纤维长度、不同纤维掺量时 AC-10C、SMA-10 沥青混合料的飞散质量损失分别见图 10、图 11。

从图 10、图 11 可以看出:相同混合料类型、相同纤维掺量时,随着纤维长度的增加,AC-10C、SMA-10 沥青混合料的飞散质量损失降低,3 mm



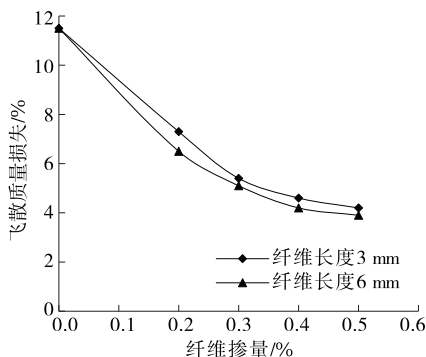


图 10 玄武岩纤维 AC-10C 沥青混合料的飞散质量损失

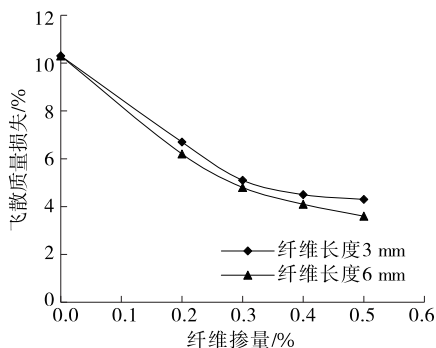


图 11 玄武岩纤维 SMA-10 沥青混合料的飞散质量损失

长度玄武岩纤维对混合料抗飞散性能的改善效果优于 6 mm 长度玄武岩纤维。相同混合料类型、相同纤维长度时,随着纤维掺量的增加,AC-10C、SMA-10 沥青混合料的飞散质量损失降低,但降低幅度逐渐变缓。这主要是由于玄武岩纤维呈束状分散在沥青混合料中,能起到吸附沥青、稳定沥青的作用,增强沥青胶浆的黏附能力,但纤维掺量过大,沥青用量又未明显增加时,沥青会被过多的束状纤维吸附,导致骨料表面结构沥青膜厚度减小,混合料抗飞散性能降低。相同纤维长度和掺量时,SMA-10 混合料的飞散质量损失优于 AC-10C 混合料。这主要是由于 SMA-10 混合料的最佳沥青用量显著高于 AC-10C 混合料,骨料之间的沥青胶浆含量较大,增强了混合料的黏结强度,混合料的抗飞散能力较优。

#### 4 结论

本文将两种不同型号玄武岩纤维以不同掺量掺入 AC-10C、SMA-10 薄层罩面沥青混合料中进行路用性能研究,得出以下结论:

(1) 相同混合料类型、相同玄武岩纤维掺量时,随着纤维长度的增加,AC-10C、SMA-10 沥青混

合料的高温稳定性、低温抗裂性、抗水损害性能提高,6 mm 长度玄武岩纤维对混合料路用性能的改善效果较优;相同混合料类型、相同纤维长度时,AC-10C 混合料的高温稳定性、低温抗裂性、抗水损害性能最优时对应的纤维掺量分别为 0.3%、0.4%、0.2%,SMA-10 混合料高温稳定性、低温抗裂性、抗水损害性能最优时对应的纤维掺量分别为 0.4%、0.4%、0.2%;从整体路用性能考虑,AC-10C、SMA-10 沥青混合料的最佳纤维掺量分别为 0.3%、0.4%。

(2) 相同混合料类型、相同纤维掺量时,随着纤维长度的增加,AC-10C、SMA-10 沥青混合料的水稳定、抗飞散性能有所降低,3 mm 长度玄武岩纤维对混合料抗飞散性能的改善效果较优;相同混合料类型、相同纤维长度时,随着纤维掺量的增加,AC-10C、SMA-10 沥青混合料的飞散质量损失降低,但降低幅度逐渐变缓,从经济性方面考虑,建议玄武岩纤维掺量取 0.3%。

#### 参考文献:

- [1] 王欣悦.不同浸润剂类型玄武岩纤维沥青混合料性能及微观结构研究[D].扬州:扬州大学,2018.
- [2] 仰建岗,刘燕,林天发.玄武岩纤维沥青混凝土路用性能研究[J].筑路机械与施工机械化,2015,32(1):53-57.
- [3] HAO M H, HAO P W. Natural mineral fiber improved asphalt mixture performance [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 638-640: 1166-1170.
- [4] FAN W X, ZHANG S F, LIU L Q. Laboratory study of Marshall of basalt fiber-modified asphalt mixture [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 256-259: 1851-1857.
- [5] 杨盼盼.玄武岩纤维沥青混合料高温及疲劳性能试验研究[D].扬州:扬州大学,2019.
- [6] 范钊.外掺剂对 SMA-13 沥青混合料长期性能影响试验研究[D].扬州:扬州大学,2020.
- [7] 穆岩.玄武岩增强纤维在重载交通沥青路面中的应用研究[D].西安:长安大学,2016.
- [8] 石宜清,邵景干,李文凯.玄武岩纤维高黏降噪型 OGFC-10 超薄磨耗层性能研究[J].河南科学,2021,39(11):1753-1758.
- [9] 成子桥,盛峰,侯利军,等.玄武岩纤维掺量对大空隙沥青混合料路用性能的影响[J].材料科学与工程学报,2021,39(5):736-744.

(下转第 83 页)

- 14(4):10—17.
- [3] 曾梦澜,陈伟,朱艳贵,等.布敦岩沥青湿法工艺掺量对改性沥青混合料性能的影响[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(11):94—101.
- [4] 金鑫,郭乃胜,孙思威,等.伊朗岩沥青改性沥青的微观特性及性能[J].建筑材料学报,2021,24(6):1265—1270.
- [5] LI R X, KARKI P, HAO P W, et al. Rheological and low temperature properties of asphalt composites containing rock asphalts [J]. Construction and Building Materials, 2015, 96: 47—54.
- [6] LV S T, WANG S S, GUO T, et al. Laboratory evaluation on performance of compound-modified asphalt for rock asphalt/styrene-butadiene rubber (SBR) and rock asphalt/nano- $\text{CaCO}_3$  [J]. Applied Sciences, 2018, 8(6): 1009.
- [7] 吴怀睿,叶奋,徐骁龙.布敦岩沥青无机粉粒微观特征及改性机理[J].西南交通大学学报,2019,54(3):556—564.
- [8] YUE Y C, ABDELSALAM M, LUO D, et al. Evaluation of the properties of asphalt mixes modified with diatomite and lignin fiber: A review [J]. Materials, 2019, 12(3): 400.
- [9] 张君韬,赵辉,杜守继,等.季冻区硅藻土改性沥青的高低温性能及抗老化性能[J].材料科学与工程学报,2020,38(5):716—721.
- [10] 马霖.PCF—硅藻土复合改性沥青混合料的路用性能研究[D].长春:吉林大学,2014.
- [11] 朱春风,刘浩,田伟,等.硅藻土—玄武岩纤维复合改性沥青胶浆性能研究[J].吉林建筑大学学报,2021,38(6):7—11+23.
- [12] 孙吉书,侯坤,王鹏飞.表面有机化硅藻土—胶粉复合改性沥青性能研究[J].热固性树脂,2021,36(5):15—20.
- [13] 汪托,郝培文,常睿.硅藻土/岩沥青复合改性沥青路用性能研究[J].中外公路,2018,38(1):296—301.
- [14] 李建科,赵小洁.岩沥青复合硅藻土改性沥青混合料试验性能研究[J].公路交通科技(应用技术版),2016,12(4):66—68.
- [15] CHENG Y C, YU D, GONG Y F, et al. Laboratory evaluation on performance of eco-friendly basalt fiber and diatomite compound modified asphalt mixture [J]. Materials, 2018, 11(12): 2400.
- [16] HUANG W T, WANG D Y, HE P Y, et al. Rheological characteristics evaluation of bitumen composites containing rock asphalt and diatomite [J]. Applied Sciences, 2019, 9(5): 1023.
- [17] WANG C, WANG H, ZHAO L D, et al. Experimental study on rheological characteristics and performance of high modulus asphalt binder with different modifiers [J]. Construction and Building Materials, 2017, 155: 26—36.

收稿日期:2022—09—30

\*\*\*\*\*

(上接第78页)

- [10] 谭海勤.不同类型纤维沥青混合料路用性能研究[J].公路与汽运,2021(3):61—63.
- [11] 孔令坤,李雪萍,冯志强.超黏精薄层罩面沥青混合料性能研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(4):9—15.
- [12] 颜鑫,郑翔南.稳定型胶粉与SBS复合改性沥青及沥青混合料性能研究[J].公路工程,2021,46(2):195—200+233.
- [13] 徐加秋,阳恩慧,罗浩原,等.基于温度应力的温拌沥青胶结料低温力学性能[J].建筑材料学报,2020,23(1):70—76.
- [14] 齐小飞,邹晓翎,阮鹿鸣,等.高RAP掺量下热再生混合料水稳定性影响因素研究[J].中外公路,2018,38(2):248—252.
- [15] 张勇,郭志坚,李文凯.复掺纤维SMA—13沥青混合料性能研究[J].河南科学,2021,39(8):1284—1288.
- [16] 刘少华,潘宝峰,许斌,等.透水沥青路面表面抗飞散性能提升技术研究[J].中外公路,2021,41(5):57—63.
- [17] 吴传海,杨艺,王旺,等.基于病害特征的湿热地区公路沥青路面破损状况评价研究[J].交通科学与工程,2023,39(4):9—16.
- [18] 朱伟串.复合改性UTAC—8薄层罩面在高速公路工程中的应用[J].公路与汽运,2023(4):92—96.

收稿日期:2022—03—25